

# **Mikroskopische Modellierung von zeitabhängiger Verkehrsnachfrage und von Verkehrsflußmustern**

Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Universität zu Köln

vorgelegt von  
Georg Hertkorn  
aus Stuttgart

Köln 2004

Berichtersteller:

Priv.-Doz. Dr. Andreas Schadschneider  
Prof. Dr. Rainer Schrader

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Juli 2004

## **Kurzzusammenfassung**

In dieser Arbeit wird ein mikroskopisches Modell zur Verkehrsnachfrage entwickelt. Für alle Personen einer sogenannten synthetischen Bevölkerung werden die Wege eines typischen Werktages prognostiziert, mit den Attributen Abfahrtszeit, Start, Ziel und Verkehrsmittel. Das Modell beruht auf einem aktivitätenbasierten Ansatz, wobei die Aktivitäten aus Erhebungsdaten abgeleitet werden. Dazu werden Tagebuchdaten einer Zeitbudgeterhebung mittels einer Clusteranalyse klassifiziert.

Die Zeitverwendungsmuster werden anhand soziodemographischer Merkmale den Personen der synthetischen Bevölkerung zugeordnet. Die Ziele der Wege werden in Abhängigkeit von den Reisezeiten gewählt. Merkmale der Person und des Weges bestimmen die Wahl des Verkehrsmittels. Jeder Pkw kann zu jedem Zeitpunkt nur für höchstens eine Tour genutzt werden. Die Attribute der Wege hängen unter anderem von den Verkehrsbedingungen ab. Durch eine Rückkopplung mit einem Verkehrsfluß- und Umlegungsmodell, das selbst nicht Gegenstand dieser Arbeit ist, wird ein konsistenter Zustand von Nachfrage, Verkehrsbelastung und den sich ergebenden Reisezeiten erreicht. Die Anwendungsmöglichkeiten des Modells werden am Beispiel der Stadt Köln untersucht. Typische Kenngrößen der Verkehrsnachfrage werden mit empirischen Daten, Daten aus anderen Modellierungen und für verschiedene Modellvarianten verglichen.

## **Abstract**

In this thesis a microscopic model of travel demand is developed. For each person of a synthetic population the trips of a typical working day are simulated, *i.e.* the aspects of the trip like departure time, origin, destination, and mode are determined. The model relies on an activity-based approach, where time allocation is derived from empirical data. To do this, diary data of a time budget survey of the Federal Statistical Office 1991/1992 are subject to a cluster analysis. For each episode (period of time, continuously dedicated to one activity) parameters for the variability of starting time and duration are derived.

The time-use patterns are assigned to the individuals of the synthetic population according to socio-demographic characteristics. The destinations of the trips are chosen using the concept of intervening opportunities, depending on travel times. The travel mode depends on the type of person, the purpose of the trip, and the distance. It is made sure, that each car of a household is only used for one tour at a given point in time. As destination choice and mode choice are responsive to the travel times in the network, a feed-back loop with a traffic simulation model is established. The traffic simulation model itself is not part of the thesis. The model is applied to the City of Cologne as a test case. Characteristic quantities of travel demand are compared to empirical findings.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>1 Ansätze der Verkehrsnachfragemodellierung</b>	<b>5</b>
1.1 Zonenbasierte Verkehrsnachfrage . . . . .	5
1.2 Verkehrsverhalten . . . . .	8
1.3 Datenbasierte Ansätze . . . . .	19
1.4 Nutzenmaximierungsmodelle . . . . .	35
1.5 Entscheidungsprozeßmodelle (computational process models) . . . . .	40
<b>2 Erzeugung von Tagesplänen</b>	<b>53</b>
2.1 Modellstruktur . . . . .	53
2.2 Aufbau einer synthetischen Bevölkerung . . . . .	59
2.3 Auswertung von Tagebuchdaten . . . . .	61
2.3.1 Datengrundlage . . . . .	62
2.3.2 Vergleich von Tagebüchern . . . . .	64
2.3.3 Klassifikation der Tagebücher . . . . .	69
2.3.4 Eigenschaften der Tagebuchgruppen . . . . .	73
2.3.5 Vergleich der Wochentage . . . . .	78
2.4 Korrektur von Touren . . . . .	79
2.5 Auswahl von soziodemographischen Variablen . . . . .	79
2.6 Orts- und Verkehrsmittelwahl . . . . .	84
2.7 Anpassung des Tagesplans an Reisezeiten . . . . .	91
2.8 Verkehrsfluß-Simulation . . . . .	94
<b>3 Anwendungsbeispiel Köln</b>	<b>99</b>
3.1 Datengrundlagen . . . . .	100
3.1.1 Bevölkerungsdaten . . . . .	100

3.1.2	Standorte . . . . .	103
3.1.3	Verkehrsnetze . . . . .	103
3.2	Parameter und Modellvarianten . . . . .	105
3.2.1	Bestimmung der Parameter für die Ortswahl . . . . .	105
3.2.2	Modellvarianten . . . . .	107
3.3	Vergleich mit einer zonenbasierten Start-Ziel-Matrix . . . . .	110
3.4	Entfernungen und Reisezeiten . . . . .	112
3.4.1	Verteilungen aus Erhebungen und der Simulation . . . . .	112
3.4.2	Räumliche Betrachtung . . . . .	114
3.5	Linke und rechte Rheinseite . . . . .	116
<b>4</b>	<b>Schlußfolgerungen</b>	<b>121</b>
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>127</b>
<b>A</b>	<b>Kodierung von Aktivitäten</b>	<b>129</b>
<b>B</b>	<b>Personengruppen in den Kölner Stadtteilen</b>	<b>139</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>155</b>

# Einleitung

Das Interesse an der Verkehrsnachfrage ist meistens motiviert durch andere Fragestellungen, zum Beispiel ob neue Verkehrswege gebaut werden sollen, ob ein Angebot im öffentlichen Nahverkehr erweitert oder zurückgenommen werden soll, ob sich der Verkehr nicht verlagern ließe, um sensible Räume zu schützen, oder wie es gelingen kann, einer bestimmten Personengruppe eine bessere Teilhabe am gesellschaftlichen Leben zu ermöglichen. Die Methode zur Bestimmung der Verkehrsnachfrage muß sich nach der eigentlichen Fragestellung richten, um angemessene Antworten liefern zu können. Ortúzar und Willumsen beschreiben die generelle Aufgabe der Verkehrsplanung:

In general terms the role of transport planning is to ensure the satisfaction of a certain demand **D** for person and goods movements with different trip purposes, at different times of the day and the year, using various modes, given a transport system with a certain operating capacity [59, S. 6].

Diese Ausgangslage wird zusätzlich dadurch komplizierter, daß die Nachfrage je nach Zeitskala keine gegebene Größe ist, weil sie nicht zuletzt stark auf das Angebot reagiert, zum Beispiel, wenn durch neue Verkehrsverbindungen kürzere Reisezeiten erreicht werden.

Wegen der nachteiligen Folgen des Verkehrs ist eine umfassendere Sicht auf das Verkehrsgeschehen gefragt. Es muß entschieden werden, für welchen Zweck und zu welcher Zeit Verkehrsinfrastruktur zur Verfügung gestellt wird. Ein Beispiel hierfür sind die Regelungen in Fußgängerzonen über die Öffnung für Lieferverkehr meist in den Morgenstunden. Damit sind aber für die Ermittlung der Verkehrsnachfrage Modelle gefragt, die zum einen die verschiedenen Wegezwecke der Verkehrsteilnehmer beschreiben und zum andern den zeitlichen Verlauf der Verkehrsnachfrage berücksichtigen. Ein Vergleich der durchschnittlichen täglichen Verkehrsbelastung einer Straße mit ihrer Kapazität gibt nur ein sehr grobes Bild über mögliche Engpässe und zeigt nicht, wer von den Engpässen betroffen ist. Sogenannte mikroskopische Modelle gehen von den Wegen von Einzel-

personen aus und erlauben daher Analysen anhand aller Merkmale, mit denen Personen beschrieben worden sind. Indem Wege aus den Aktivitäten des Tagesverlaufs abgeleitet werden, ist die zeitliche Komponente automatisch enthalten.

Ein weiterer Vorteil der mikroskopischen Betrachtungsweise ist die Möglichkeit, Randbedingungen und Zwänge genau dort in die Prozesse aufzunehmen, wo sie ihre Ursache haben. So läßt sich zum Beispiel sehr leicht sicherstellen, daß die Tagesabläufe von Personen konsistent sind, indem eine Person erst zu einem zweiten Weg aufbricht, nachdem sie das Ziel des ersten Weges erreicht und gegebenenfalls einige Zeit dort für die Ausübung einer Aktivität verbracht hat. Die zeitliche Abfolge der Wege wird also aus der Abfolge der Aktivitäten eines Tages abgeleitet. Das ist die Grundidee des aktivitätenbasierten Ansatzes. Mit dem Rekurs auf Aktivitäten als Motive für Fahrten bekommt man den Schlüssel für ein tiefergehendes Verständnis für die Bedingungen, die Ursachen sowie für Möglichkeiten der Veränderung der Verkehrsnachfrage in die Hand. Darauf wird in Abschnitt 1.2 ausführlicher eingegangen. Bei anderen Aspekten ist es wichtig, auch die Interaktion von Menschen untereinander abzubilden, zum Beispiel, wenn Fahrzeuge in einem Haushalt gemeinsam genutzt werden: Ist eines der Haushaltsmitglieder mit einem Fahrzeug unterwegs, kann das Fahrzeug in dieser Zeit nicht von anderen Haushaltsmitgliedern verwendet werden.

Das Konzept, vom einzelnen Verkehrsteilnehmer auszugehen, verlangt freilich auch nach Abgrenzung und Interpretation. Das Modell bleibt eine Abstraktion. Es liegt die Versuchung nahe, bei den Bestimmungsgrößen für die Entscheidungen über einzelne Aspekte eines Weges oder Tagesplans jeweils weitere Details zu integrieren. Die Entscheidung über ein Verkehrsmittel hängt im Einzelfall ab vom Wetter, von Nutzungsbarrieren, die an mangelnder Vertrautheit mit Netzen und Tarifen von öffentlichen Verkehrsmitteln liegen mögen, bis hin zur körperlichen Konstitution des Verkehrsteilnehmers, die eine Fahrradfahrt ausschließen kann. Je mehr Details jedoch integriert werden, desto größer wird der Bedarf an Eingangsgrößen, mit denen das Modell zu versorgen ist.

In der vorliegenden Arbeit ist das Anwendungsfeld ein gesamter Ballungsraum, so daß nicht zuletzt der Aufwand der Datenerhebung hier der Detailierung Grenzen setzt. Es gibt aber auch einen methodischen Aspekt, der eine Beschränkung der Zahl der Details nahelegt. Die einzelnen Aspekte eines Weges sind nicht unabhängig voneinander, sondern in unterschiedlicher Weise miteinander gekoppelt. Der Zweck kann das Verkehrsmittel und die Zeit bestimmen, umgekehrt bestimmt aber die Reisezeit, ob sich eine bestimmte Aktivität überhaupt noch unterbringen läßt und ob Wege zu Touren zusammengelegt werden. Je nach der Aufteilung in Touren sind wiederum bestimmte Ver-



kehrsmittelkombinationen möglich oder ausgeschlossen. Es lassen sich hier fast beliebig weitere Zusammenhänge konstruieren. Mit der Einführung eines jeden neuen Aspekts multipliziert sich theoretisch die Zahl der Kopplungen mit der Zahl der Alternativen für den neuen Aspekt. Das macht es schwierig, ein Modell zu validieren und mögliche Artefakte zu identifizieren. Je weniger die Wechselwirkungen innerhalb eines Modells noch nachvollziehbar sind, desto problematischer wird die Interpretation der Reaktion des Modells auf eine Veränderung der Eingangsgrößen.

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, wie sich ein Modell zur Schätzung der Verkehrsnachfrage aufbauen läßt, indem man sich an den grundlegenden Randbedingungen für Zeitverwendung und Mobilität orientiert. Die Nachfrage nach Mobilität wird entsprechend dem aktivitäten-basierten Ansatz als abgeleitete Nachfrage aufgefaßt. Daher ist die Zeitverwendung von Personen zu untersuchen, die Aufschluß über die Abfolge von Aktivitäten an verschiedenen Orten und verbindende Wege gibt. Es ist daher zuerst zu klären, wie sehr sich einzelne Tagesabläufe von Personen voneinander unterscheiden und an welche Merkmale der Person oder des Haushalts diese Unterschiede gekoppelt sind. Es ist dann eine Methode zu finden, wie die Orte bestimmt werden, an denen Aktivitäten ausgeübt werden. Diese Orte werden damit zu Zielen von Wegen. Bei der Verkehrsmittelwahl sind Randbedingungen zu beachten, die sich aus der Verfügbarkeit und den Reisezeiten ergeben. Wie oben beschrieben, ist die Verkehrsnachfrage abhängig von der Erreichbarkeit und der Auslastung der Verkehrsnetze. Da diese selbst eine Folge der Nachfrage ist, ergibt sich eine Rückkopplung, die sich im Modell wiederfinden muß. Es soll untersucht werden, wie sich die Verkehrsnachfrage verändert, wenn im Modell einzelne Randbedingungen gelockert werden oder sich die Situation des Verkehrsnetzes verändert.

In Kapitel 1 werden verschiedene Ansätze der Modellierung von Verkehrsnachfrage vorgestellt. Sie unterscheiden sich in der Problemsicht und folglich auch in den Verfahren zur Behandlung der Aufgaben, die sich im Zusammenhang mit der Modellierung stellen. Kapitel 2 beschreibt den Aufbau eines Modells, das insofern vollständig ist, daß es für die Simulation der Verkehrsnachfrage einer Großstadt einsetzbar ist. Die Anwendung des Modells und einzelne Aspekte des Modellverhaltens werden in Kapitel 3 diskutiert. Schlußfolgerungen und die Zusammenfassung finden sich in den letzten beiden Kapiteln.



# Kapitel 1

## Ansätze der Verkehrsnachfragemodellierung

### 1.1 Zonenbasierte Verkehrsnachfrage

Die erste Generation von Verkehrsnachfragemodellen orientiert sich an der räumlichen Einteilung von Untersuchungsgebieten in Zonen oder Verkehrszellen [59]. Die betrachtete Größe ist die Zahl der Fahrten, die in Zone  $i$  ihren Ursprung haben und in Zone  $j$  enden. Wieviele Fahrten von einer Zone  $i$  unternommen werden, wird zu einer Reihe von Merkmalen dieser Zone in Beziehung gesetzt. Typische Kriterien sind: Zahl der Einwohner, ihr Einkommen, die Struktur der Haushalte, die Bodenpreise, die Siedlungsdichte und die Erreichbarkeit. Eine Möglichkeit, um Prognosen für die zukünftige Entwicklung der Verkehrsnachfrage zu machen, besteht darin, anzunehmen, daß die zukünftige Zahl der Fahrten mit der gegenwärtigen Zahl der Fahrten über einen Wachstumsfaktor verknüpft ist:

$$t_f = F * t_0 ,$$

Für den Wachstums- oder Schrumpfungsfaktor  $F$  soll gelten:

$$F = \frac{f(P_f, I_f, C_f, \dots)}{f(P_0, I_0, C_0, \dots)},$$

mit den Einflußgrößen Bevölkerung  $P$ , Einkommen  $I$ , und Pkw-Besitz  $C$ .  $f$  ist oft eine multiplikative Funktion ihrer Argumente.

Nimmt man an, daß ein linearer Zusammenhang zwischen den Einflußgrößen und der Verkehrsnachfrage besteht, läßt sich für den Ansatz

$$t = a + bC$$

anhand der Daten für verschieden Zonen mit einer Regressionsanalyse überprüfen, ob sich  $b$  tatsächlich signifikant von Null unterscheidet. Der Ansatz wird durch mehrere Faktoren zu einer multiplen Regression erweitert. Bei diesem Vorgehen ist zu beachten:

Zonen-basierte Modelle können nur die Variation im Aufkommen von Fahrten zwischen Zonen erklären. Daher können sie nur erfolgreich sein, wenn die Unterschiede zwischen Zonen in angemessener Weise die wahren Gründe für die Variabilität der Fahrten widerspiegeln. Damit dies der Fall ist, müßten die Zonen nicht nur soziökonomisch homogen zusammengesetzt sein, sie müßten außerdem einen möglichst großen Bereich von Bedingungen abdecken. Problematisch ist besonders, daß die hauptsächlichen Variationen in den Daten im Bereich der Fahrten innerhalb einer Zone zu finden sind [59, S. 126].

Die Annahme, daß das Fahrtenaufkommen jeweils linear von den Einflußgrößen abhängt, ist eine starke Einschränkung, der aber durch eine Transformation der Variablen oder die Aufteilung in Intervalle, die unabhängig voneinander untersucht werden, begegnet werden kann.

Eine flexiblere Beschreibung des Verkehrsaufkommens ergibt eine Kategorisierung der Haushalte oder der Personen. Dies setzte sich in den sechziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts in Großbritannien durch. Die Fahrten einer Verkehrszelle setzen sich dann zusammen aus den Fahrten einer jeden Kategorie. Dabei kommt es darauf an, eine Kategorisierung zu finden, so daß die Variationen innerhalb einer Kategorie möglichst klein sind. Der Vorteil dieses Vorgehens ist, daß es unabhängig von der Zoneneinteilung des Untersuchungsgebietes ist. Es werden keine Annahmen über die Form der Beziehung gemacht, mit denen die Attribute zur Einteilung der Kategorien mit der Zahl der Fahrten zusammenhängen. Der Zusammenhang braucht nicht monoton, geschweige denn linear zu sein. Er kann außerdem von Klasse zu Klasse unterschiedlich sein, so daß sich zum Beispiel die Haushaltsgröße unterschiedlich auswirkt für Haushalte mit einem oder mehreren Autos. Mit der Zahl der Kategorien wächst allerdings auch die Zahl erforderlicher Daten, um verlässliche Schätzungen für das Fahrtenaufkommen in einer jeden Kategorie zu bekommen [59].

Wenn man für jede Zone  $i$  die Zahl der Fahrten  $O_i$  geschätzt hat, die dort beginnen, ebenso wie die Zahl der Fahrten  $D_i$ , die dort enden, dann muß im nächsten Schritt die Frage beantwortet werden, wie die einzelnen Fahrten miteinander verknüpft sind. Wieviele der Fahrten, die von Zone  $i$  ausgehen, enden in Zone  $j$ ? Dieser Schritt wird Verkehrsverteilung genannt. Ein vielfach verwendeter Ansatz ist das sogenannte Gravitationsmodell.

In allgemeiner Form ist hier die Zahl der Fahrten  $t_{ij}$  von  $i$  nach  $j$ :

$$t_{ij} = A_i O_i B_j D_j f(c_{ij})$$

$A_i$  und  $B_j$  sind Ausgleichsfaktoren, die so bestimmt werden, daß die Summe über alle Zonen gleich den Randsummen für ausgehende und endende Fahrten ist.  $c_{ij}$  sind die Kosten einer Fahrt zwischen  $i$  und  $j$ , wobei zu den Kosten auch die Reisezeit zählt.  $f$  ist die Empfindlichkeit, mit der die Reisenden auf die Kosten reagieren (engl.: *deterrence function*). Wenn  $f$  gleich dem Quadrat der Distanz zwischen den Zonen ist, wird die Analogie des Ansatzes mit dem Gravitationsgesetz der Physik offensichtlich. Es läßt sich zeigen, daß der Ansatz die Entropie des Systems maximiert für  $f(c_{ij}) = \exp(-\beta c_{ij})$  [59]. Die Matrix, die aus den Zahlen  $t_{ij}$  entsteht, wird als Start-Ziel Matrix oder O-D Matrix bezeichnet.

Die Aggregation durch die Einteilung in Zonen ist zwangsläufig mit einem Informationsverlust verbunden. So läßt sich zum Beispiel die Dynamik des Verkehrs im Tagesablauf nur mit Mühe in Form von O-D Matrizen beschreiben, indem verschiedene Matrizen für verschiedene Tageszeiten erstellt werden. Selbst dann läßt sich aber nicht mehr erkennen, welche Fahrt möglicherweise in einem Zeitabschnitt beginnt, aber in einem anderen endet, oder welche Fahrt mit welcher Rückfahrt in Beziehung steht. Das führt auf die Frage der Wegeketten. Die einzelnen Wege, die in einer O-D Matrix auftauchen, sind in Wirklichkeit nicht unabhängig voneinander. Wenn ein Verkehrsteilnehmer auf der Fahrt zum Einkaufen durch einen Stau aufgehalten wird, dann verschieben sich die Fahrten, die auf den Einkauf folgen, auch auf spätere Zeitpunkte [57]. Schmiedel [66] weist darauf hin, daß die Abstraktion, die mit der Aggregation einhergeht, es erschwert, die Validierungs- und Kalibrierungsverfahren nachzuvollziehen. Da Verkehrsmodelle aber vielfach dazu entworfen werden, Planungsentscheidungen zu unterstützen, ist es wichtig, daß die Entscheidungsgrundlagen für die politisch legitimierten Gremien und möglichst sogar für die betroffenen Bürger transparent sind.

Dadurch, daß auf steigende Verkehrsnachfrage nicht mehr durch eine beliebige Erweiterung der Infrastruktur reagiert werden kann und weil z.B. die Vermeidung von Verkehr selbst das Ziel von politischen Maßnahmen geworden ist, hat sich das Forschungsinteresse von der reinen Prognose der Verkehrsnachfrage hin zu den Ursachen für ihre Entstehung verschoben. Im nächsten Abschnitt wird beschrieben, mit welchen Konzepten diese Fragen angegangen werden, und was sich daraus für die Modellierung ergibt.

## 1.2 Verkehrsverhalten

Bei der Beschreibung von Verhalten spielen Motive eine entscheidende Rolle. Sie sind der Schlüssel für Verhaltensänderungen. Schmitz [67] unterscheidet bei den Mobilitätsmotiven der Gegenwart die *Mediatorfunktion des Mobilitätsverhaltens* und den *Mobilitätsprozeß als Handlungsziel*. Die Mediatorfunktion besagt, daß Menschen sich von einem Ort zum andern bewegen, weil sie nur dort einer bestimmten Tätigkeit nachgehen können. Damit ist hier das Hauptmotiv für Mobilität, daß sie mittelbar der Erfüllung von Bedürfnissen dient. Die Bedürfnisse unterteilt Schmitz unter Bezug auf die Arbeiten von Schwartz und Bilsky [68] in

- biologisch begründete Bedürfnisse des Organismus
- Interaktionsbefürfnis zur interpersonalen Kooperation
- sozial institutionalisierte Forderungen für das Wohlergehen und Überleben der ganzen Gemeinschaft

Wenn man Wege nach Zwecken einteilt wie Arbeitswege, Wege für Einkäufe und Erledigungen und Freizeitwege, stellt man die Mediatorfunktion in den Vordergrund. Um die entsprechenden Wege zurückzulegen, müssen in der Regel Zeit, Geld oder körperliche Arbeit aufgewendet werden, die als Kosten bewertet werden, und in vielen Modellen wird davon ausgegangen, daß Menschen versuchen, diese Kosten zu minimieren [67, 77].

Wenn der Mobilitätsprozeß selbst das Handlungsziel ist, stellt sich die Frage, welche Bedürfnisse damit gestillt werden können. Schmitz [67] nennt die *Erweiterung des Aktionsraumes* und „*sensation seeking*“ und mit Bezug auf die Verkehrsmittelwahl die *Regulation von Privatheit*. „Die Lebensfähigkeit des Individuums [hängt] unter anderem von seinen Möglichkeiten [ab], Interaktionen zu regulieren und zu kontrollieren [67, S. 108].“ Die Fahrt mit dem privaten Auto sichert dem Menschen damit eine gleichsam private Umgebung, obwohl er sich für die Fahrt in den öffentlichen Raum begeben muß. Wenn man die Möglichkeit der Ortsveränderung etwas weitergehend als ein wichtiges Kriterium der persönlichen Freiheit ansieht, und wenn es ein Bedürfnis des Menschen ist, diese Freiheit zu erfahren, dann kann Mobilitätsverhalten auch durch dieses Motiv bestimmt sein.

Der Anreiz zur *Erweiterung des Aktionsraumes* wird in der Stimulation und in der Suche nach Anregungen gesehen. Damit dient hier wieder die Fortbewegung nicht nur der Distanzüberwindung sondern stillt selbst ein Bedürfnis. Schmitz [67] vermutet, daß dieser Zusammenhang besonders bei Fahrten in der Freizeit eine Rolle spielt. Es ist aber

durchaus denkbar, daß auch bei der Wahl von Arbeitsplätzen und Wohnstandorten oder bei der Entscheidung für oder gegen einen Tele-Arbeitsplatz der Reiz der Abwechslung durch die Ortsveränderung ein Gegengewicht zu den Kosten bildet.

Kaiser, Schreiber und Fuhrer [43] haben die emotionale Bedeutung speziell des Autofahrens untersucht, indem sie eine Gruppe von Vielfahrern mit einer Gruppe von Wenigfahrern verglichen haben. Vielfahrer legen nach ihrer Einteilung in der Freizeit mehr als 200 km pro Woche zurück; Wenigfahrer fahren weniger als 100 km in der Woche. Obwohl es keine Unterschiede in Bezug auf die Einkommensverhältnisse gab, sind Wenigfahrer häufiger Eigentümer ihrer Wohnung oder geben mehr für Miete aus als die Vielfahrer. Vielfahrer brechen häufiger zu Touren auf, die gar kein eigentliches Ziel haben. Für sie hat das Auto eine höhere emotionale Bedeutung in Bezug auf Sicherheit und Autonomie. Auch wenn die untersuchte Stichprobe mit 26 verwertbaren Fragebögen sehr klein ist, so sind die Ergebnisse doch ein Hinweis darauf, daß das Mobilitätsverhalten nicht allein durch die Mediatorfunktion bestimmt wird.

Die Betonung der Motive für Fahrten und der Bedingungen, unter den sie abgewickelt werden, hat zur Entwicklung einer Klasse von Modellen geführt, die als *aktivitätenbasiert* bezeichnet wird: Wege entstehen, weil Aktivitäten an verschiedenen Orten ausgeführt werden. Das Verkehrsaufkommen leitet sich ab aus den Aktivitätenprogrammen der Menschen [9, 18, 24, 32, 77]. Da prinzipiell auch Spazierfahrten in die Aktivitätenkataloge eingeordnet werden können, schließen die Modelle beide oben vorgestellte Motive für Mobilität ein. Aus der Ausgangsthese werden von verschiedenen Autoren sehr unterschiedliche Schlußfolgerungen für den Gegenstand der Modellierung abgeleitet. Man kann die Aktivitätenprogramme als eine neue Einflußgröße für das Verkehrsaufkommen ansehen, die mit bekannten Merkmalen einer Person in Beziehung gesetzt wird. In einem weitergehenden Verständnis werden die Aktivitätenprogramme selbst Gegenstand der Betrachtung: Personen wird ein bestimmtes Repertoire an Aktivitäten zugeordnet, und man untersucht, an welchen Tagen, mit wem, zu welcher Zeit und in welcher Reihenfolge die Aktivitäten ausgeübt werden. Dieser Ansatz wird in den meisten Modellen verfolgt, die in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden. Der nächste Schritt führt schließlich zu den Motiven für die Aktivitäten selbst. Brüggemann [10] geht davon aus, daß Aktivitäten dazu dienen, Bedürfnisse der Menschen zu befriedigen. Wenn man diese Bedürfnisse kennt, und weiß, welches Bedürfnis zu einem bestimmten Zeitpunkt das Motiv für eine Handlung wird, erhält man ein sehr flexibles Modell mit einem sehr weitgehenden Erklärungsanspruch. Prägnant formuliert das Nagel [56] am Beispiel des Kühlschranks. Der Mangel an Milch ist der Auslöser für den Weg zum Lebensmittelladen. Die

Frage, wie sich Aktivitätenprogramme verändern, kann zum einen dazu beitragen, besser zu verstehen wie sie zustandekommen, zum anderen erweitert man die Möglichkeiten zur Prognose von Reaktionen der Menschen auf veränderte Randbedingungen. Gärling [29] unterstellt, daß das Wissen um Orte eine große Rolle spielt, um Menschen in die Lage zu versetzen, eine fundierte (*informed choice*) Wahl darüber zu treffen, was sie tun, wo sie es tun und wann sie es tun, um ihre Bedürfnisse zu erfüllen. Es gibt die Auffassung, daß Wissen über räumliche Zusammenhänge erst ungenau erfaßt und nach und nach vervollständigt wird. Mit dem Modell von Kurz- und Langzeitgedächtnis versucht man zu beschreiben, wie einzelne Erfahrungen in dauerhaftes Wissen übergehen.

Die zeitliche und räumliche Struktur, die Aktivitätenprogramme für die Verkehrsnachfragemodellierung so interessant macht, bedeutet zugleich, daß sie ungleich schwerer zu erfassen und zu beschreiben sind im Vergleich zu skalaren Merkmalen von Personen. Hägerstrand [34] trägt die Orte, die ein Mensch im Laufe eines Tages aufsucht, nach Entfernung vom Wohnort und der Zeit des Aufenthalts in einem zweidimensionalen Diagramm auf. Wegen der begrenzten Geschwindigkeit und wenn man fordert, daß die betrachtete Person am Abend wieder nach Hause zurückkehrt, müssen diese Orte alle innerhalb einer Raute (*prism* bei Hägerstrand) liegen. Legt man weiter einige Aufenthalte fest, so werden die möglichen Positionen für weitere Aufenthalte und Wege durch Parallelogramme beschrieben. Dies wird aus Abbildung 1.1 und ersichtlich. Über die Einschränkung, denen die Bewegung der Menschen im Raum unterliegt, kann man also wertvolle Informationen über Aktivitätenprogramme gewinnen. Es ist bemerkenswert, daß die Gliederung, die Hägerstrand für die Einschränkungen vorschlägt, den oben aufgeführten Bedürfnissen von Schmitz entsprechen:

*capability constraints:* Physikalische und physiologische Beschränkungen: Eine Person kann sich zu einem Zeitpunkt nur an einem Ort aufhalten, und sich nur mit begrenzter Geschwindigkeit bewegen. Es gibt körperliche Bedürfnisse, auf die sie Rücksicht nehmen muß, zum Beispiel indem Zeit für Essen und Schlafen im Aktivitätenprogramm vorgesehen werden.

*coupling constraints:* Viele Aktivitäten erfordern die Abstimmung mit anderen Menschen. Sie sind eingebettet in Abläufe, die zum Beispiel Arbeitszeiten und Unterrichtszeiten festlegen. Aber auch im privaten Bereich muß man sich für gemeinsame Unternehmungen auf Zeiten und Orte festlegen.

*authority constraints:* Gesetzliche oder institutionelle Regelungen legen fest, daß manche Räume nicht oder nur zu bestimmten Zeiten zugänglich sind. Es ist eine Frage



der Interpretation, ob man zum Beispiel Ladenöffnungszeiten unter diesem Punkt einordnet oder sie als *coupling constraints* auffaßt.

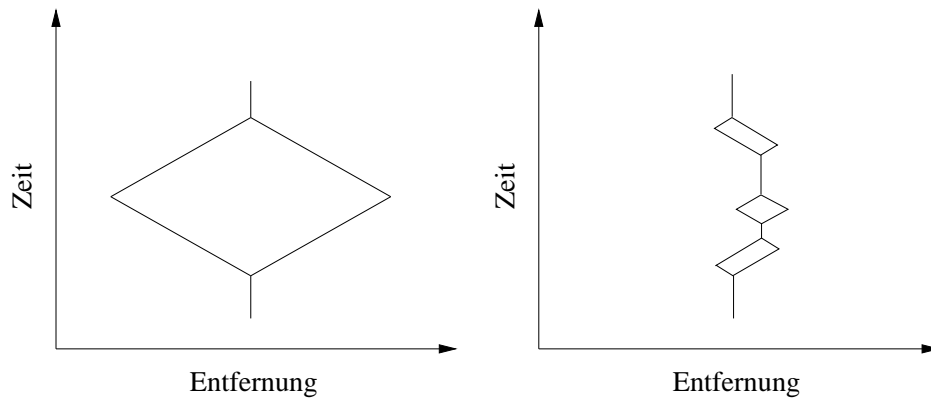


Abbildung 1.1: Raute der maximal erreichbaren Punkte und verbleibender Spielraum bei zwei Aufenthalten am Arbeitsplatz nach [34].

Aus gleichsam entgegengesetzter Richtung nähert man sich der Modellierung von Aktivitätenprogrammen, wenn man sie als das Ergebnis einer Auswahl ansieht und davon ausgeht, daß Personen ihre Aktivitäten so organisieren, daß sie den größten Nutzen davon haben. Das Prinzip der Nutzenmaximierung ist die Grundaussage der Theorie rationaler Entscheidungen. Um zu verdeutlichen, was es besagt, soll zunächst beschrieben werden, womit sich die Theorie rationaler Entscheidungen befaßt. Bei Schmidt [65] findet sich eine ausführliche Einführung in die Theorie und eine Diskussion verschiedener Systeme von Axiomen, mit der sie sich begründen läßt. In einer Entscheidungssituation hat ein Individuum die Auswahl zwischen mehreren Handlungsmöglichkeiten. Die Handlungen führen zu verschiedenen Konsequenzen, wobei die Konsequenzen nicht von der Handlung allein, sondern auch von Umweltbedingungen abhängen können. Ein beliebtes Beispiel ist die Entscheidung darüber, ob man beim Verlassen des Hauses einen Schirm mitnehmen soll oder nicht. Die Alternativen seien mit  $f_1$  und  $f_2$  bezeichnet. Die relevanten Zustände der Umwelt sind:  $A$ : *Es regnet* und  $B$ : *Es bleibt trocken*. Die Handlungen haben je nach dem Eintreffen der Umweltzustände verschiedenen Konsequenzen:

	$A$ : Regen	$B$ : kein Regen
$f_1$ : Regenschirm mitnehmen	trocken bleiben	trocken bleiben und den Schirm herumtragen
$f_2$ : Regenschirm zuhause lassen	naß werden	trocken bleiben

Es ist klar, daß für die Entscheidung von Bedeutung ist, welcher der Umweltzustände  $z$  eintritt. Es kann sein, daß die Entscheiderin sich dessen aber nicht sicher ist. In solchen Fällen wird davon ausgegangen, daß die Entscheiderin Annahmen über die Wahrscheinlichkeit  $P(z)$  der Umweltzustände macht. Es wird nun weiter unterstellt, daß die Entscheiderin mit den Konsequenzen einen Nutzen verbindet, so daß sie jeder Konsequenz  $c$  eine reelle Zahl zuordnen kann: die Größe des Nutzens  $U(c)$ .

Das Prinzip der Nutzenmaximierung oder genauer der Maximierung des Nutzenerwartungswertes verknüpft nun Präferenzen über Handlungen mit dem Nutzen der erwarteten Konsequenzen [65, S. 33]. Die Präferenzen über Handlungen werden notiert als  $f_1 \geq f_2$ , wenn  $f_2$  nicht gegenüber  $f_1$  vorgezogen wird:

Es seien individuelle Präferenzen über den Alternativen gegeben sowie eine Nutzenfunktion  $U$  und eine Wahrscheinlichkeitsfunktion  $P$ . Das Prinzip der Maximierung des Nutzenerwartungswertes (MNE) ist genau dann erfüllt, wenn für alle Handlungen  $f_1$  und  $f_2$  gilt:

$$f_1 \geq f_2 \Leftrightarrow \sum_{z \in Z} U(f_1(z)) \cdot P(z) \geq \sum_{z \in Z} U(f_2(z)) \cdot P(z). \quad (1.1)$$

In verschiedenen Formulierungen der Theorie wurde nun untersucht, welche Eigenschaften die Präferenzen einer Entscheidung haben müssen, damit 1.1 erfüllt ist. Es zeigt sich, daß es unter anderem notwendig ist, daß die Präferenzen transitiv sind, das heißt wenn  $f_1$  gegenüber  $f_2$  vorgezogen wird, und  $f_2$  wird gegenüber  $f_3$  vorgezogen, dann soll  $f_1$  auch gegenüber  $f_3$  vorgezogen werden.

Eine zweite Bedingung ist das sogenannte *sure thing principle* (STP). Hier geht es um Paare von Alternativen,  $(f, g)$  und  $(f', g')$ . Jedes Paar wird in einer eigenen Auswahl-situation betrachtet. Man nehme der Einfachheit halber an, daß  $A$  und  $C$  die beiden einzigen relevanten Zustände der Umwelt sind. Es soll gelten:

$$\begin{aligned} f(A) &= f'(A), \\ g(A) &= g'(A), \\ f(C) &= g(C), \\ f'(C) &= g'(C). \end{aligned}$$

Die Entscheiderin sieht sich also für den Fall von  $A$  in beiden Situationen vor die gleichen Alternativen gestellt. Die Situationen dürfen sich nach der Voraussetzung nur für den Fall  $C$  unterscheiden. In diesem Fall sind aber die Konsequenzen bezogen auf die Alternativen

gleich. Die Forderung des *sure thing principle* ist: Wenn  $f$  gegenüber  $g$  vorgezogen wird, so muß in der zweiten Auswahl auch  $f'$  gegenüber  $g'$  vorgezogen werden.

Es zeigt sich, daß Personen in Experimenten sowohl die Transitivität als auch das STP systematisch verletzen und je nach Experiment eher bereit sind, die Prinzipien fallen zu lassen, als ihre Auswahl zu revidieren, wenn man sie auf die Diskrepanz aufmerksam macht. Ein Beispiel von Allais [1] soll das für das STP verdeutlichen:

	$P(A) = 1\%$	$P(B) = 10\%$	$P(C) = 89\%$
$f$	\$ 100	\$ 100	\$ 100
$g$	\$ 0	\$ 500	\$ 100
$f'$	\$ 100	\$ 100	\$ 0
$g'$	\$ 0	\$ 500	\$ 0

Die meisten Menschen, die mit diesem Beispiel konfrontiert waren, haben  $f$  gegenüber  $g$  vorgezogen und  $g'$  gegenüber  $f'$  und damit im Widerspruch zum *sure thing principle* gehandelt.

Schmidt [65] bemerkt, daß den Ergebnissen solcher Beispiele mit dem Einwand begegnet wird, daß für die Entscheiderin die Voraussetzungen des STP nicht gegeben seien, weil die Konsequenzen für  $f$ , wo in jedem Fall ein Gewinn erzielt wird, eine Entscheidungssituation schaffen, die in der Auswahl zwischen  $f'$  und  $g'$  nicht gegeben ist. Wenn man dieser Argumentation folgt, läßt sich jedoch durch eine neue Interpretation der Voraussetzung *immer* sicherstellen, daß keine Widersprüche zum Prinzip der MNE auftreten. Wenn das Prinzip aber trivialerweise erfüllt ist, stellt sich die Frage, wie aus seiner Aussage noch interessante Schlußfolgerungen gezogen werden können.

Experimente anderer Art belegen, daß es Situationen gibt, in denen das Prinzip der MNE nicht anwendbar scheint, weil Menschen entgegen ihrem Vorteil handeln, indem sie zum Beispiel Angebote ablehnen, weil sie ihrem Gerechtigkeitsempfinden widersprechen, oder indem sie einen Teil ihres Gewinns einsetzen, um Mitspieler zur Einhaltung von Spielregeln zu bewegen, auch wenn sich daraus kein direkter Nutzen ergibt [27].

Kirsch [45] weist darauf hin, daß sich die Kritik an der Theorie rationaler Entscheidungen als deskriptiver Theorie an ihren Voraussetzungen entzündet und zitiert Simon [69], der in den kognitiven Beschränkungen der Rationalität des Individuums einen entscheidenden Schwachpunkt der Theorie sieht:

- (1) Rationalität erfordert vollständige Kenntnis und Voraussicht der möglichen Konsequenzen, die sich bei der Wahl ergeben werden. Tatsächlich ist die Kenntnis der Konsequenzen stets fragmentarisch.

- (2) Da diese Konsequenzen in der Zukunft liegen, muß bei ihrer Bewertung die Einbildungskraft den Mangel an tatsächlich erlebtem Gefühl ersetzen. Werte können jedoch nur unvollkommen antizipiert werden.
- (3) Rationalität erfordert eine Wahl zwischen allen möglichen Verhaltensweisen. Tatsächlich werden jedoch jeweils nur sehr wenige aller möglichen Alternativen erwogen [69].

Damit eine Person im Sinne der Theorie rational handeln kann, muß sie sich also nicht nur entsprechend den Auswahlregeln verhalten, sie muß auch in der Lage sein, sie auf die jeweilige Situation anzuwenden. Dies erfordert unter Umständen einen erheblichen Aufwand für die Analyse der Alternativen, der nicht zuletzt deutlich wird, wenn man Entscheidungsverhalten für das Zustandekommen eines Aktivitätenprogrammes nach dem Prinzip der MNE simuliert. Ein entsprechendes Modell wird auf Seite 36 ff. vorgestellt.

Eine Lösung des Menschen, um dem Analyseaufwand zu entgehen, besteht darin, in vielen Situationen so zu handeln, wie er in der gleichen oder ähnlichen Situation schon früher gehandelt hat. Das führt zur Unterscheidung von gewohnheitsmäßigem Verhalten und echten Entscheidungen. Echtes Entscheiden ist erst dann erforderlich, wenn das Individuum einer neuen Situation begegnet, für die es keine passende Reaktion besitzt [45]. Sowohl bei der Gestaltung von Aktivitätenprogrammen als auch beim Verkehrsverhalten im engeren Sinne kommt beides vor. So wird zum Beispiel die Wahl eines Verkehrsmittels in vielen Fällen gewohnheitsmäßig getroffen. Wenn aber der Weg selbst nicht routinemäßig zurückgelegt wird, oder besondere Begleitumstände eintreten, beginnt die Suche nach Alternativen, und die Vor- und Nachteile der Alternativen werden miteinander verglichen. Man könnte jetzt annehmen, daß Gewohnheiten sich so ausbilden, daß das resultierende Verhalten den Nutzen maximiert. Tatsächlich haben Verplanken, Aartz und van Knippenberg [75] am Beispiel der Verkehrsmittelwahl gezeigt, daß habitualisiertes Verhalten ein Beharrungsvermögen hat. Es wird auch bei veränderten Bedingungen nicht immer angepaßt. Es wurde untersucht, in welchem Umfang Menschen auf zur Verfügung gestellte Informationen zurückgreifen, wenn sie mit einer bestimmten Aufgabe konfrontiert sind. Daraus läßt sich schließen, ob die entsprechende Situation als eine Entscheidungssituation aufgefaßt wird. Bei der Aufgabe, etwas in der Stadt einzukaufen, rufen Studenten, die gewohnheitsmäßig ein Fahrrad benutzen, weniger Informationen ab als Studenten, die in ihrer Verkehrsmittelwahl weniger festgelegt sind. Wenn allerdings Informationen abgerufen werden, so sind dies bei der Gruppe der Fahrradfahrer signifikant mehr Informationen über das gewohnheitsmäßig benutzte Verkehrsmittel als über die Alternativen. Ein weiterer Test zeigte ein analoges Ergebnis für Informationen über

die Situation und die Umstände unter denen die Aufgabe bewältigt werden sollte. Auch aus anderen Untersuchungen ist bekannt, daß beispielsweise Autofahrer das Angebot des öffentlichen Personennahverkehrs an ihrem Wohnort kaum kennen [58], so daß allein dadurch ein Ungleichgewicht zwischen den Alternativen besteht.

Bei der Beschreibung des Verhaltens von Menschen in Entscheidungssituationen werden dem geschlossenen Modell der Theorie rationaler Entscheidungen offene Modelle gegenübergestellt [45]. Sie orientieren sich an den *Prozessen*, die bei der Handhabung von Entscheidungssituationen eine Rolle spielen: Das Individuum ist mit Anforderungen und Informationen aus der Umwelt konfrontiert. Es interpretiert diese Informationen und gelangt auf der Grundlage seiner Persönlichkeit und seiner momentanen Einstellungen zu einer Definition der Situation, die schließlich seine Reaktion bestimmt. (Siehe Abbildung 1.2.) In dieser Sichtweise wird deutlich, daß die Definition der Situation in der

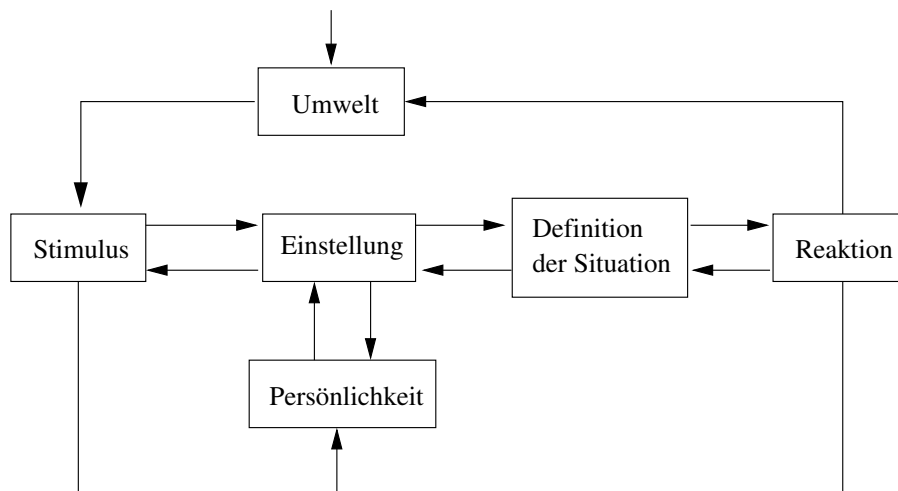


Abbildung 1.2: *Einstellung, Persönlichkeit, Definition der Situation* [45, S. 17]

Regel zu einem eingeschränkten und subjektiven Bild der Realität führt. Da die Persönlichkeit nicht statisch ist sondern sich aufgrund der Erfahrung verändert, verändert sich auch die Wahrnehmung der Person, und Entscheidungen können in einer vergleichbaren Situation auch zu einem anderen Ergebnis führen. Entscheidungsprozeßmodelle (engl.: *computational process models*) sind der Versuch, solche Vorgänge zu imitieren. Ihr Vorteil in der Modellierung von Verkehrsnachfrage ist unter anderem darin zu sehen, daß die Interdependenzen der verschiedenen Aspekte des Verkehrsverhaltens berücksichtigt werden können. Während sich Nutzenmaximierungsmodelle an einem vorgegebenen Apparat zur Schätzung der Parameter orientieren können, ist die Bedeutung der Parameter

in Entscheidungsprozeßmodellen und die Methode mit der sie geschätzt werden können, nicht immer offensichtlich. Oft wird bei der Begründung von Modellelementen an ein intuitives Verständnis des Lesers appelliert. Es ist nicht immer klar, inwiefern sich die einzelnen Schritte tatsächlich an dem Prozeß orientieren, der auch beim Menschen zu einer Entscheidungsfindung führt, oder ob das Ziel schon als erreicht gilt, wenn überhaupt eine konsistente und vollständige Vorgehensweise angegeben werden kann. ‚Vollständig‘ heißt hier, daß alle Aspekte der Planung und alle relevanten Alternativen erfaßt werden. Die Aspekte (*dimensions* bei Doherty [18], *Verhaltensebenen* bei Lipps [52]) lassen sich gliedern in:

- Auswahl von Aktivitäten
- Festlegung der Reihenfolge der Ausübung, Wiederholungen
- Wahl der Anfangszeit und der Dauer
- Wahl des Ortes
- Abstimmung mit anderen Personen
- gegebenenfalls Wahl des Verkehrsmittels
- gegebenenfalls Wahl einer Route

Die Modellierung wird dadurch komplex, daß sich die verschiedenen Aspekte fast alle wechselseitig beeinflussen. Manche Aktivitäten sind so wichtig, daß sie alle anderen Aspekte bestimmen, wie zum Beispiel ein geschäftlicher Termin. Bei anderen Anlässen kann die Wahl der Route dazu führen, daß man zufällig etwas entdeckt, das zu einer spontanen Entscheidung für eine Aktivität führt. Daraus leiten sich dann die Dauer der Ausübung und die Reihenfolge anderer Aktivitäten ab, ja vielleicht werden neue Aktivitäten nötig, die bisher nicht vorgesehen waren. Man kommt zum Beispiel an einem bisher unbekannten Möbelgeschäft vorbei, das ein günstiges Angebot für einen lange gesuchten Schrank macht, beschließt sich über das Angebot zu informieren, wird handels-einig, organisiert den Transport und widmet einige Zeit der Umgestaltung der Wohnung. Jedes Modell legt explizit oder implizit eine feste oder eine wechselnde Hierarchie dieser Aspekte fest. Die Bedeutung und die Art der wechselseitigen Abhängigkeiten sind schwierig empirisch zu überprüfen. Es gibt jedoch Ansätze, dies wenigstens für ausgewählte Konstellationen zu versuchen [7]. Eine weitere Besonderheit des Verkehrsverhaltens ist, daß gleichzeitig mehrere Zeithorizonte betrachtet werden müssen: Die Entscheidung, an einem bestimmten Tag zu einer bestimmten Uhrzeit zur Arbeit zu gehen, steht

im Prinzip für Wochen im voraus fest. Es kann aber sein, daß sie innerhalb von Stunden revidiert wird, wenn sich herausstellt, daß ein krankes Kind zuhause versorgt werden muß [57].

Wenn mit einem aktivitätenbasierten Ansatz Prognosen mithilfe einer Simulation erstellt werden sollen, ist es kaum möglich, an der Gliederung des Untersuchungsgebietes in Zonen festzuhalten. Aktivitätenprogramme lassen sich nur sinnvoll für einzelne Personen betrachten und können nicht einfach die klassischen Determinanten in aggregierten Modellen ersetzen. Der aktivitätenbasierte Ansatz wird in sogenannten Mikrosimulationsmodellen operationalisiert. Timmermans [74] und auch Widmer und Axhausen [77] fassen den Begriff ‚Mikrosimulationsmodell‘ enger. Sie begründen das damit, daß sich der Aufbau der Modelle, die sie hier einordnen, auch an den jeweils vorliegenden Daten und nicht allein an einem theoretischen Modell orientiert. Nagel und Esser [57] sehen in dem mikroskopischen Ansatz an sich eine entscheidende Weiterentwicklung: Veränderungen der Verkehrsinfrastruktur und das Angebot neuer Verkehrsdienstleistungen dauern von der Planung bis zur Realisierung oft mehrere Jahre oder gar Jahrzehnte. In solchen Zeiträumen können Betriebe ihren Standort und Personen ihren Wohnort wechseln, es kann sein, daß sich Haltungen und Präferenzen verändern oder daß neue Technologien neue Möglichkeiten eröffnen. Die Veränderungen, die sich dadurch für die betroffenen Menschen ergeben, bleiben nicht auf den rein verkehrlichen Bereich wie das Fahrverhalten oder die Auswahl einer Route beschränkt. Es werden zum Beispiel durch den Neubau einer Straße Ziele erreichbar, die vorher nicht in akzeptabler Zeit erreichbar waren. Wenn ein Verkehrsmodell in der Lage sein soll, Aussagen über die Auswirkungen solcher Veränderungen zu machen, muß es konzeptionell einen Zugang zu solchen Fragestellungen eröffnen. Das ist am besten möglich, wenn die Objekte des Verkehrsgeschehens ihre jeweilige Entsprechung im Modell haben: “In principle, in such a tool people should be represented as people, cars should be represented as cars, and traffic lights should be represented as traffic lights. And not as, say, departure rates, traffic streams, and capacities, respectively. A microscopic approach is one that keeps our science open for development” [57].

Ein ehrgeiziger Versuch, eine vollständige Mikrosimulation für mehrere Millionen von Menschen zu implementieren wurde mit dem Projekt TRANSIMS unternommen [57]. An seiner Modellstruktur läßt sich erkennen, welche Aufgaben in einem Mikrosimulationsmodell gelöst werden müssen. Verschiedenen Aspekten des Verkehrsverhaltens entsprechen in TRANSIMS verschiedene Module, deren Zusammenwirken in Abbildung 1.3 gezeigt ist: Das erste Modul stattet die Repräsentanten der Bevölkerung für das Modell

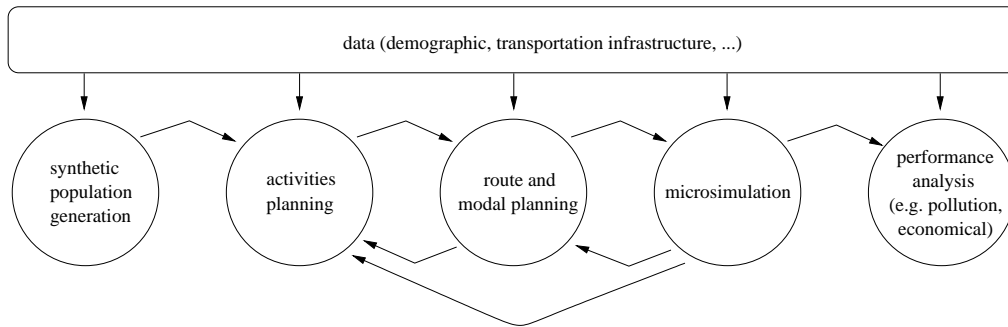


Abbildung 1.3: Design von TRANSIMS nach [57]

mit soziodemographischen Merkmalen aus. Dabei soll die Zusammensetzung der synthetischen Bevölkerung für eine gegebene räumliche Einteilung möglichst gut mit der Zusammensetzung der realen Bevölkerung im Untersuchungsgebiet übereinstimmen. Das Ergebnis des zweiten und des dritten Moduls ist eine Liste von Plänen für jede Person. Ein Plan enthält die Abfolge der Aktivitäten, die aufgesuchten Orte, die Verkehrsmittel und die Routen. Die Verkehrsnachfrage, die sich aus den Plänen ergibt, wird im Modul *Mikrosimulation* in den Verkehrsnetzen abgebildet. Für die Analyse können die Daten der Mikrosimulation in fast beliebiger räumlicher und zeitlicher Differenzierung oder auch für einzelne Personengruppen zusammengefaßt werden.

Die Rückkopplung dient dazu, im Modell einen konsistenten Zustand von Plänen und Verkehrsgeschehen zu erreichen: Die Planung wird solange an die Reisezeiten angepaßt, und diese werden wiederum aufgrund der neuen Planung ermittelt, bis ein stationärer Zustand erreicht ist. Dabei wird nicht behauptet, daß sich das tatsächliche Verkehrsgeschehen in einem Zustand des Gleichgewichts befindet. Der stationäre Zustand wird aber als der beste Ausgangspunkt für ein Verständnis von Übergängen und Nichtgleichgewichtszuständen angesehen. Die Entwickler von TRANSIMS sehen die Rückkopplung als einen entscheidenden Kunstgriff an, die Verflechtung der verschiedenen Aspekte des Verkehrsverhaltens im Modell zu repräsentieren. Rückkopplung führt ein System aber nicht immer in einen stationären Zustand. Es können auch Oszillationen auftreten: Wenn zum Beispiel für eine Start-Ziel Verbindung zwei Routen *A* und *B* miteinander konkurrieren und im ersten Schritt ein großer Teil der Reisenden die Route *A* gewählt hat, erscheint Route *B* im nächsten Schritt wegen der geringeren Belastung attraktiver. Wenn nun viele wechseln, kehrt sich die Attraktivität wieder um. Um solche Oszillationen zu vermeiden, werden in TRANSIMS nicht jedesmal alle Fahrer mit neuen Plänen versorgt, sondern nur ein Teil. Dabei ist der Anteil der Reisenden, die eine neue Route wählen, größer als



der Anteil derjenigen, die auch ihre Aktivitätenplanung verändern. Um zu verhindern, daß immer die gleichen Personen ihre Pläne anpassen und andere Pläne immer noch auf überholten Reisezeiten beruhen, wächst die Wahrscheinlichkeit für eine Neuplanung mit dem Alter eines Plans.

Die Art und Weise, wie die Anpassung der Pläne behandelt wird, wird auch dadurch gerechtfertigt, daß sie eine Entsprechung zu der Reaktionen realer Personen hat [57]. Es erscheint zum Beispiel plausibel, daß ein Reisender einen Plan wählt, der sich in der Vergangenheit als erfolgreich herausgestellt hat. Wenn man Zustandsänderungen des Systems untersuchen will, ist es jedoch notwendig, zu wissen, auf welchen Zeitskalen die jeweiligen Entscheidungen getroffen werden und nach welchen Regeln eine einmal getroffene Festlegung geändert wird. Wegen des mikroskopischen Ansatzes ist das Modellsystem in dieser Richtung erweiterbar.

Im folgenden werden Vertreter der verschiedenen Modelltypen vorgestellt. Die Auswahl orientiert sich daran, jeweils die typischen Eigenschaften der verschiedenen Konzepte deutlich machen zu können. Eine umfassendere Übersicht findet sich bei Timmermans [74] und bei Widmer und Axhausen [77].

## 1.3 Datenbasierte Ansätze

Alle hier vorgestellten Modelle sind für die Anwendung in der Praxis konzipiert und sind daher auf Daten zur Charakterisierung der Menschen, des Raumes und der Infrastruktur in dem jeweiligen Untersuchungsgebiet angewiesen. Es gibt aber Ansätze, die sich ausdrücklich auf eine bestimmte Erhebungsmethode beziehen, indem die Ergebnisse der Erhebung auch Einfluß auf die Modellstruktur haben.

### Verhaltensähnliche Personenkreise bei Schmiedel

Die Untersuchungen von Schmiedel [66] zu verhaltensähnlichen Personenkreisen sind motiviert durch den Versuch, die Schwächen zonenbasierter Verfahren zur Prognose von Verkehrsnachfrage zu überwinden. Die Analyse des Zusammenhangs zwischen soziodemographischen Merkmalen und der Verkehrsnachfrage, wird geleitet von der Frage nach der Anwendung in der verkehrsplanerischen Praxis. Die Schwächen der räumlichen Aggregation sieht Schmiedel [66] nicht nur darin, daß Ursache-Wirkungszusammenhänge nur unzureichend erfaßt werden, er bemängelt auch, daß die Interpretationen der Ergebnisse der notwendigen Kalibrierungsverfahren für den Laien und die politischen

Entscheidungsträger kaum noch nachzuvollziehen seien. In der Umkehrung sieht er also einen der Vorteile der personenbezogenen Modellierung darin, daß ihr Aufbau leichter zu vermitteln ist. Die Grundannahme seines Konzeptes übernimmt er von Kutter [51]: „Individuelle Merkmale der Person bedingen individuelle Rollenstrukturen, diese wiederum determinieren bestimmte zeitliche Folgen von ortsgebundenen Tätigkeiten, und die Folge räumlich getrennter Tätigkeiten erzwingt eine Folge von Ortsveränderungen.“ Hierin findet sich die These des aktivitätenbasierten Ansatzes, wonach Verkehr durch die Ausübung räumlich getrennter Tätigkeiten hervorgerufen wird. Darüberhinaus wird unterstellt, daß die Teilnahme an Aktivitäten von der Rolle von Personen abhängt, die sich wiederum aus den individuellen Merkmalen ableiten läßt. Die Aufgabe, die sich Schmiedel stellt, ist, empirisch zu überprüfen, wie sich unterschiedliches Rollenverhalten in Bezug auf Verkehrsverhalten manifestiert, und die Beziehung zu sozioökonomischen Merkmalen der Personen herzustellen. Die Untersuchung soll zur Lösung folgender Fragen beitragen [66]:

- Wie kann die Gesamtbevölkerung in eine überschaubare und auch planungsgerechte Anzahl verhaltensähnlicher Personenkreise aufgegliedert werden und wie sind diese gegeneinander abzugrenzen?
- Wie läßt sich Verhaltensähnlichkeit quantifizieren und wie homogen und kompakt sind die verhaltenshomogenen Personenkreise wirklich?
- Wie stark differieren die Personenkreise in ihrer strukturellen Zusammensetzung und in den Ausprägungen ihrer Verhaltensmuster?
- Wie stark sind die Effekte raumstruktureller Gegebenheiten auf das Alltagsverhalten und welche regionalen Verhaltensunterschiede in den Aktivitätenmustern lassen sich nachweisen?
- Mit welchem Detaillierungsgrad sind die ermittelten Verhaltensmuster für die Modellanwendung mit dem Aktivitätenansatz bereitzustellen, wie sieht der zugehörige Modellalgorithmus aus und wie groß ist die erzielte Abbildungsgenauigkeit der erzeugten Aktivitätennachfrage und ihrer Zeitstruktur gegenüber realen Verhältnissen?

Das Problem ist ein Klassifizierungsproblem, wobei an die Klassen, hier *Personenkreise*, folgende Anforderungen gestellt werden:

1. Die Personenkreise sollen so abgegrenzt sein, daß sie in der Lage sind, unterschiedliches Alltagsverhalten adäquat zu beschreiben.
2. Die Personenkreise sollen intern möglichst ähnlich sein, extern sollen sie sich voneinander unterscheiden.
3. Die Personenkreise sollen sowohl hinsichtlich ihrer Verhaltensgrundmuster als auch hinsichtlich ihrer sozioökonomischen und demographischen Zusammensetzung persistent sein (Verhaltenskonstanz, strukturelle Stabilität).
4. Die Personenkreise sollen bezüglich ihrer Bevölkerungsanteile aus verfügbaren Datensammlungen ableitbar und auch prognostizierbar sein.
5. Die Personenkreise sollen eindeutig gegeneinander abgrenzbar sein und in ihrer Vereinigung die Gesamtbevölkerung umfassen.

Die Anforderungen 1, 2 und 5 sind typische Anforderungen an eine Klassifizierung, während sich die Anforderungen 3 und 4 aus der Verwendung der Personenkreise in einem Modell ergeben.

Die Datengrundlage der Klassifizierung sind die Wegetagebücher der kontinuierlichen Erhebung zum Verkehrsverhalten (KONTIV) von 1976. Da die Klassifizierung auf den Tätigkeiten der Personen beruhen soll, werden die Angaben zu den Zielen und zum Zweck der Wege genutzt, um auf die Tätigkeiten zu schließen, die sich jeweils an einen Weg anschließen. Die Unterscheidung von nacheinander am gleichen Ort ausgeführten Tätigkeiten ist allerdings nicht möglich. Der Aktivitätenkatalog umfaßt:

- zu Hause,
- Arbeit,
- Dienstgeschäfte (dienstliche und geschäftliche Erledigungen außerhalb der Arbeitsstätte),
- Ausbildung,
- Einkauf,
- unterwegs zu Fuß, mit dem Fahrrad oder Mofa,
- unterwegs mit dem Auto oder Motorrad,
- unterwegs mit öffentlichen Verkehrsmitteln,
- sonstiges.

Die Datensätze werden anhand der stündlichen Zeitbudgetanteile dieser Aktivitäten verglichen, und die Stunden zwischen Mitternacht und vier Uhr werden ausgenommen. Da sich die Budgets jeweils zu einer Stunde addieren müssen, kann eine der Aktivitäten ohne Informationsverlust weggelassen werden, und es ergeben sich für den Vergleich der Datensätze 160 Merkmale. Daneben gibt es eine zweite Festlegung der Merkmale, die auf den täglichen Zeitbudgets beruht. Zur Klassifizierung wird ein agglomeratives Clusterverfahren gewählt. Da jedoch die Verarbeitung der über 67000 Datensätze mit der vorhandenen Rechnerausstattung nicht möglich ist, werden die Daten vorgruppiert anhand der Variablen Geschlecht, Familiensituation (eine Lebenszyklus-Variable), Berufstätigkeit, Schulabschluß des Haushaltsvorstandes, Pkw-Besitz, Wohnverhältnisse und Gebietskategorie. Von den Basiseinheiten der Clusterung wird außerdem gefordert, daß sie mindestens 50 Fälle enthalten sollen, was auf 271 der 576 möglichen Kategorien zutrifft. Bei der Clusterung anhand der stündlichen Budgets lassen sich fünf gut voneinander unterscheidbare Klassen bilden; bei der Clusterung anhand der Tagesbudgets ist sieben eine günstige Klassenzahl. Zur Typisierung werden die Klassen „miteinander verglichen, um häufig auftretende gemeinsame Merkmalsausprägungen ‚herauszufiltern‘“ [66]. Die Kombination der beiden Typisierungen führt schließlich auf sieben Klassen, die sich wie folgt beschreiben lassen:

1. Erwerbstätige mit Pkw,
2. Erwerbstätige Männer ohne Pkw,
3. Erwerbstätige Frauen ohne Pkw,
4. Studenten,
5. Schüler und Lehrlinge,
6. Hausfrauen, Rentner und sonstige Nichterwerbstätige mit Pkw,
7. Hausfrauen, Rentner und sonstige Nichterwerbstätige ohne Pkw.

Bei einer detaillierteren Beschreibung der Klassen fällt auf, daß für die Männer zwischen den ersten beiden Personenkreisen ein soziales Gefälle besteht in Bezug auf die Schulbildung und die Stellung im Beruf. Bei den Frauen, also einem entsprechenden Vergleich zwischen den Personenkreisen 1 und 3, ist das nicht der Fall. Bei den *Studenten* ist bemerkenswert, daß jede/jeder zweite einen Pkw besitzt und daß 62% aller Wege

als MIV-Wege zurückgelegt werden. Die Personenkreise der Hausfrauen und Rentner zeichnen sich durch eine große Homogenität der Tagesabläufe aus.

Bei der Typisierung kommen keine raumstrukturellen Variablen vor. Eine gesonderte Untersuchung zum Einfluß dieser Variablen anhand von zwei Kontrastgruppen ergibt, daß sich für jeweils vergleichbare Personenkreise die Tagesprogramme nur wenig unterscheiden, bis auf den Umstand, daß in den ländlichen Gemeinden häufiger Tage vollständig zuhause verbracht werden. Die Raumstruktur hat aber einen mittelbaren Einfluß durch die Korrelation mit anderen Variablen wie zum Beispiel dem Bildungsstand und durch die Auswirkungen auf verkehrliche Größen, die direkt damit verknüpft sind, wie Entfernungs- und Reisezeitbudget und die Verkehrsmittelwahl.

Schmiedel stellt fest, daß die Personenkreise seiner Typisierung nur noch 20% der Variation der stündlichen Budgets erklären können, während es bei der ursprünglichen Clusterung noch 60% bis 90% waren. Hier zeigt sich, daß das Konzept der Personenkreise sehr eng gefaßt ist. Es wird unterstellt, daß die Rollen die Menschen auf eine einzelne Klasse von Tagesprogrammen festlegen. Ein Vorschlag, wie diese Annahme gelockert werden kann, wird in Abschnitt 2.5 vorgestellt.

Die Datenbasis der KONTIV-Wegetagebücher zwingt zu Einschränkungen bei der Umsetzung des aktivitätenbasierten Ansatzes. Aktivitäten werden nur als Anschlußaktivitäten an Wege berichtet, die Einteilung der Tätigkeiten ist relativ grob, und es kann immer nur eine Aktivität zwischen zwei Wegen vorkommen. Das Erhebungsinstrument des Wegetagebuchs kehrt die eigentlich verfolgte Argumentationslinie um: Die Wege bestimmen die Struktur der erhaltenen Daten, anstelle der Aktivitäten. Daher läßt sich die Struktur der Organisation des Tagesablaufs, von der angenommen wird, daß sie von den Aktivitäten bestimmt wird, nur sehr unvollkommen nachzeichnen.

Ein ähnliches Problem ergibt sich bei der Auswahl der Klassifizierungsmerkmale. Da hier bei den Wegen schon nach dem Verkehrsmittel unterschieden wird, ist es wenig verwunderlich, daß das Kriterium Pkw-Besitz bei der Typisierung der Personenkreise eine entscheidende Rolle spielt. Es erscheint sinnvoller, beim Vergleich der Tagesabläufe die Wege noch nicht nach Verkehrsmitteln zu differenzieren, um dann überprüfen zu können, ob die Verfügbarkeit eines Verkehrsmittels sich auf die Organisation des Tagesablaufs oder nur auf die Verkehrsmittelwahl auswirkt.

## CHASE

Doherty und Miller [19] haben eine computergestützte Erhebungsmethode für das Aktivitätenplanungsverhalten von Haushalten entwickelt, die von Mühlhans [55] auch in Deutschland erprobt worden ist. Auf diesen Daten baut ein Modell für Aktivitätenprogramme auf, das diese aus eher langfristigen, statischen Aktivitäten und kurzfristig, flexibel geplanten Bestandteilen zusammensetzt. Die Befragung mit CHASE (*Computerised Household Activity Schedule Elicitor*) beginnt mit einem persönlichen Vorinterview. Dabei werden Personen- und Haushaltsdaten erfaßt und ein spezifisches Aktivitätenprogramm zusammengestellt. Die Befragten werden in die Software eingewiesen und arbeiten sieben Tage lang mit einem computergestützten Wochenplaner, in den sie geplante Aktivitäten im Voraus eintragen oder im Nachhinein dokumentieren. In einem abschließenden Interview werden Besonderheiten der Planungswoche ermittelt. Dadurch, daß vor der eigentlichen Planungsarbeit ein spezifisches Aktivitätenprogramm zusammengestellt wird, können Aktivitäten ausführlich mit Attributen ausgestattet werden, die beispielsweise regelmäßig wiederkehrende Aktivitäten von einmaligen, außergewöhnlichen unterscheiden. Die Software arbeitet mit einer Datenbank, auf die verschiedene Programmteile zugreifen, so daß in einem Mehrpersonenhaushalt Abstimmungen und Rücksichtnahmen innerhalb des Haushalts festgestellt werden können.

Der Planer soll mindestens einmal täglich aufgerufen werden. Es können dann entweder geplante Aktivitäten eingetragen werden oder Angaben für schon stattgefundene Aktivitäten ergänzt werden. Dabei werden auch Gründe für Änderungen erfaßt. Der Planer überprüft auf Vollständigkeit, zum einen, indem Dialoge Pflichtfelder enthalten, zum andern, indem im jeweils zwei Tage zurückliegenden Tagesplan keine zeitlichen Lücken mehr vorkommen dürfen. Eine weitere Kontrolle besteht darin, daß auf zeitliche Überschneidungen hingewiesen wird.

Wege werden jeweils der folgenden Aktivität zugeordnet. Es ist zwar möglich, bei Einträgen des Verkehrsmittels Kombinationen von Verkehrsmitteln anzugeben, welcher Teil eines Weges aber mit welchem Verkehrsmittel bewältigt wurde, wird nicht erfaßt.

Bei der Untersuchung, die Doherty [18] selbst in Kanada durchgeführt hat, stellte sich heraus, daß etwa 38% aller Aktivitäten am ersten Sonntag eingetragen werden, 15% werden ein oder mehr Tage im voraus geplant, 20% werden am selben Tag geplant, und 28% werden spontan wahrgenommen. Doherty schließt daraus, daß das Planungsverhalten ein zweistufiger Prozeß ist. Ein Teil der Aktivitäten wird routinemäßig festgelegt, dann folgt eine Phase einer angepaßten, flexibleren Planung auf verschiedenen Zeithorizonten.

Entsprechend hat das vorgeschlagene Simulationsmodell zwei Teile: Zunächst wird

für jeden Haushalt ein Aktivitätenrepertoire zusammengestellt, Routine-Aktivitäten werden identifiziert, und es wird ein Aktivitätengerüst zusammengestellt. In einem zweiten Schritt folgt der Aktivitätenplaner für die Woche.

Das Aktivitätenrepertoire ist eine Menge von Aktivitäten, die durch für die Planung entscheidende Attribute gekennzeichnet sind: maximale, minimale und mittlere Dauer, Häufigkeit, frühestes und spätestes Ende der Durchführung, zwingend oder möglicherweise anwesende Personen, Kosten, mögliche Orte für die Ausübung und anderes. Über Methoden der Diskriminanzanalyse soll bestimmt werden, welche Aktivitäten Routineaktivitäten sind, und über ein Optimierungsverfahren wird das Gerüst eines Zeitplans festgelegt, das als Eingangsgröße für den kurzfristigen Wochenplaner dient. Die vorgeplanten Aktivitäten sind immer schon im Zeitplan, bevor der Wochenplaner überhaupt zu arbeiten beginnt. Das entspricht im Planungsprozeß einer sehr hohen Priorität. Tatsächlich kann sich die Priorität aber durch aktuelle Gegebenheiten verändern. Im Modell muß daher ebenfalls eine veränderliche Priorität zugelassen werden.

Im Planungsablauf für den Haushalt kommen die einzelnen Personen wiederholt nacheinander an die Reihe, so daß die Planung für alle Haushaltsmitglieder gleichzeitig abläuft. Es wird jeweils die Aktivität mit der höchsten Priorität in Betracht gezogen und in ein freies Zeitfenster eingeplant. Dieses kann das direkt anschließende Zeitfenster sein, was einer spontanen Entscheidung entspricht, es kann aber auch in der Zukunft liegen. Es werden auch zufällige Aktivitäten generiert, die Unfälle oder überraschende Besuche sein können. Dann wird die Planung verfeinert, indem Orte und Verkehrsmittel bestimmt werden. Schließlich wird entschieden, ob weitere Aktivitäten geplant werden sollen oder ob eine andere Person an die Reihe kommt. Konflikte mit den Zeitplänen anderer Personen werden von einem eigenständigen Modul behandelt. Dadurch werden schon geplante Aktivitäten nochmals betrachtet, was zu einer gewissen Optimierung des Zeitplans führt.

Doherty [18] sieht die Stärken dieses Vorgehens darin, daß es sich auf eine ausgefeilte Befragungsmethode stützt, die viele Informationen über das Planungsverhalten und relevante Einflüsse liefert. Außerdem wird das Konzept einer Nutzenoptimierung mit der Beschreibung des Planungsprozesses kombiniert. Er geht davon aus, daß Routinen so ausgestaltet werden, daß unter gegebenen Bedingungen ein Nutzenoptimum erreicht wird. Der anschließende Wochenplaner macht das Verfahren flexibel und eröffnet die Möglichkeit, auch auf kurzfristige Veränderungen noch zu reagieren.

CHASE ist ein umfassendes Erhebungsinstrument und erlaubt es, grundlegende Daten zum Planungsverhalten von Menschen zu sammeln. Da das Verfahren von den Teil-

nehmern einiges an Engagement erfordert, ist allerdings nicht auszuschließen, daß die Beschäftigung mit dem Instrument dazu führt, daß sich Planungsentscheidungen verändern. Die Teilnehmer sind aufgefordert, sich am Sonntag Gedanken über den Verlauf der Woche zu machen. Die Zahl der Einträge, die an diesem Sonntag schon im Planer vorgenommen werden, wird von der Planbarkeit der Woche abhängen, aber auch von der Fähigkeit der Teilnehmer, sich die vor ihnen liegenden Tage zu vergegenwärtigen und von ihrer Bereitschaft, nur mögliche Ereignisse schon mal einzutragen, unter dem Risiko, daß diese Eintragungen wieder geändert werden müssen. Es kann sogar sein, daß die intensive Beschäftigung mit der eigenen Zeitverwendung die Planung selbst verändert, da der Teilnehmer nun aktiv versucht, schon frühzeitig einen stimmigen Zeitplan zu entwickeln. In Abschnitt 1.2 wurde schon darauf hingewiesen, daß es problematisch ist, Routinen als das Ergebnis einer Optimierung zu betrachten, weil die Ausbildung von Routinen an sich für den Menschen einen Nutzen hat, der nicht im direkten Zusammenhang mit dem Nutzen der Handlungen steht, auf die sich die Routinen beziehen.

### **Bestimmung von Reaktionspotentialen bei Lipps**

Das Simulationsmodell von Lipps [52] stützt sich auf die Daten des Deutschen Mobilitätspanels. Die Aktivitäten eines Tages werden zu einem sogenannten *maßgeblichen Aktivitätenmuster* reduziert, das dann die Grundlage für Untersuchungen zur *interpersonellen Variation* (Vergleich verschiedener Personen) und zur *intrapersonellen Variation* (Vergleich verschiedener Tage ein und derselben Person) bildet. Außerdem wird überprüft, ob sich Personen, deren soziodemographische Merkmale sich ändern, vor und nach der Änderung jeweils wie der entsprechende Querschnitt verhalten. Über eine Varianzanalyse wird der Einfluß verschiedener soziodemographischer Variablen auf die Unterschiede in den Aktivitätenmustern bestimmt. Diese Informationen werden für eine Simulation der Verkehrsnachfrage genutzt, die sich wieder an das Schema für Aktivitätenpläne anlehnt.

Die Befragungen des Panels begannen 1994 mit einer Stichprobe von etwa 500 Personen, 1996 wurde die Stichprobe auf über 1400 Personen erweitert, 1999 nahmen über 1800 Personen daran teil. Idealerweise wiederholen die Teilnehmer zweimal, werden also insgesamt drei Mal befragt. Eine größere Zahl von Wiederholungen ist wegen Gewöhnungseffekten nicht sinnvoll. Die Haushalte geben über soziodemographische und ökonomische Variablen Auskunft, und jede Person über 10 Jahren führt pro Welle für eine Woche ein Wegetagebuch, „in das alle relevanten Aspekte des Verkehrsverhaltens (Zeitpunkte von Beginn und Ende aller Wege, Entfernung, verwendete Verkehrsmittel,



Zweck u.a.) eingetragen werden“ [52, S. 25].

Zur Bildung des maßgeblichen Aktivitätenmusters werden die Tage nach Ausgängen gegliedert. Ein Ausgang umfaßt alle Aktivitäten und Wege vom Verlassen der Wohnung bis zur Rückkehr in die Wohnung. Die Ausgänge werden ihrerseits charakterisiert durch jeweils eine Hauptaktivität. Maximal vier Hauptaktivitäten bilden das maßgebliche Aktivitätenmuster. Kombiniert man die jeweils häufigsten Hauptaktivitäten an jeder Position der Aktivitätenmuster der Tage einer Woche, erhält man das Referenzmuster. Der Tag, der dem Referenzmuster am ähnlichsten ist, wird als Referenztag bezeichnet.

Um für jeden Ausgang eine Hauptaktivität festlegen zu können, werden die Aktivitäten geordnet, und zwar in der folgenden Rangfolge: Dienstlich > Ausbildung > Arbeit > Service > Einkauf > Freizeit > sonstige Aktivität. Es werden aber auch verschiedene Ausgänge miteinander verglichen. Hier ist die Ordnung der Hauptaktivitäten je nach dem beruflichen Status der Person unterschiedlich:

- Berufstätige:  
Arbeit/dienstlich > Ausbildung > Service > Einkauf > Freizeit
- Arbeitslose und Auszubildende:  
Ausbildung > Arbeit/dienstlich > Service > Einkauf > Freizeit
- Sonstige:  
Service > Arbeit/dienstlich > Ausbildung > Einkauf > Freizeit

Die vier Elemente (Spalten) des maßgeblichen Musters kommen wie folgt zustande:

1. Schritt: Bestimme die (erste) Hauptaktivität mit der höchsten Priorität. Sie wird in die zweite Spalte eingetragen und (Tages-) Hauptaktivität genannt.
2. Schritt: Bestimme die Hauptaktivität der höchsten Priorität der nachfolgenden Ausgänge und trage sie in Spalte drei ein.
3. Schritt: Spalte vier enthält die Hauptaktivität mit der höchsten Priorität, die auf die Aktivität in Spalte drei folgt.
4. Schritt: Bestimme die (erste) Hauptaktivität mit der höchsten Priorität aller Aktivitäten, die vor der Tageshauptaktivität liegen und trage sie in die erste Spalte ein.

Hauptaktivität	Ausgang 1		Ausgang 2		Ausgang 3		Ausgang 4	
	Anteil [%]	Dauer [min]	Anteil [%]	Dauer [min]	Anteil [%]	Dauer [min]	Anteil [%]	Dauer [min]
fehlt	94.0	0	7.1	0	58.6	0	90.5	0
Arbeit/dienstlich	0.2	252	38.9	506	4.2	244	0.3	171
Ausbildung	0.1	234	11.6	380	1.1	189	0.1	131
Einkauf	3.1	79	24.3	118	14.1	87	2.7	82
Freizeit	1.9	142	11.9	221	17.9	170	5.5	147
Service	0.7	58	6.2	126	4.1	74	0.9	57

Tabelle 1.1: *Häufigkeit der Hauptaktivitäten und mittlere Dauer der maßgeblichen Ausgänge an Werktagen. Panel 1997 (gewichtet) [52, Tabelle 10, S. 47].*

Es stellt sich heraus, daß die nach diesem Schema ermittelte Tageshauptaktivität eine besondere Bedeutung hat, denn der mit ihr verbundene Ausgang ist im Mittel wesentlich länger als die anderen Ausgänge des maßgeblichen Musters (siehe Tabelle 1.1).

In Tabelle 1.2 läßt sich die Häufigkeit der häufigsten maßgeblichen Muster ablesen. Keines der elf häufigsten Muster enthält einen Eintrag in der ersten oder vierten Spalte, und fünf der Muster bestehen aus nur einem Ausgang.

Das Referenzmuster bezieht sich auf eine Personenwoche und ist dasjenige Muster, das sich ergibt, wenn man die jeweils häufigsten Hauptaktivitäten in jeder Spalte auswählt. Der Referenztag ist der Tag der betrachteten Woche, der dem Referenzmuster am ähnlichsten ist.

Interessant ist die Aufteilung der Referenztage auf die einzelnen Wochentage: Unter den Tagen, die den anderen am ähnlichsten sind, sind Montage und Dienstag am häufigsten vertreten, und der Freitag hebt sich als der Tag, der am wenigsten oft Referenztag wird, deutlich von den anderen Wochentagen ab (siehe Tabelle 1.3). Für den Vergleich der Muster, schlägt Lipps folgende Gewichtung der Spalten vor.

Spalte Nummer	1	2	3	4
Gewicht	1	8	4	2

Es zeigt sich, daß im Panel von 1997 annähernd die Hälfte aller Tage dem jeweiligen Referenzmuster entsprechen, also eine Ähnlichkeit von 15 nach dem oben beschriebenen Schema haben. Auch die Werte für die Ähnlichkeit von 11, 7 und 3 ragen aus dem

Maßgebliches Muster				Anteil [%]	Kumul. Anteil [%]
-	Arbeit	-	-	16.8	16.8
-	Einkauf	-	-	12.1	28.9
-	Freizeit	-	-	9.7	38.6
-	Arbeit	Freizeit	-	4.8	43.4
-	-	-	-	4.8	48.2
-	Arbeit	Einkauf	-	4.5	52.7
-	Einkauf	Freizeit	-	4.3	57.1
-	Ausbildung	Freizeit	-	4.1	61.2
-	Ausbildung	-	-	4.1	65.3
-	Dienstlich	-	-	3.8	69.1
-	Einkauf	Einkauf	-	3.4	72.5

Tabelle 1.2: *Häufigkeit der maßgeblichen Muster an normalen Werktagen. Panel 1997 (gewichtet) [52, Tabelle 18, S. 53].*

Wochentag	Anteil an den Referenztagen [%]
Montag	25.4
Dienstag	24.1
Mittwoch	18.4
Donnerstag	20.9
Freitag	11.2

Tabelle 1.3: *Verteilung der Referenztage. Panel 1997 (gewichtet) [52, Tabelle 22, S. 59].*

Histogramm heraus und haben Anteile von etwa 18%, 14%, und 5%. Das erklärt sich daraus, daß Spalten häufig nicht besetzt sind, nicht besetzte Spalten aber als gleich gewertet werden.

Vergleicht man die Abstände der maßgeblichen Aktivitätsmuster mit dem Muster des Referenztages und teilt man die Personen der Stichprobe nach ihrem beruflichen Status auf, so ergeben sich relativ kleine Werte (Tabelle 1.4), und „Vollzeitberufstätige Personen haben aufgrund der Regelmäßigkeit ihrer beruflichen Verpflichtungen, Personen in Ausbildung aufgrund der Regelmäßigkeit ihrer Ausbildungsverpflichtungen eine erheblich

geringere Variation ihres Aktivitätsverhaltens als Personen mit einem anderen beruflichen Status. [52, S. 78].“

Beruflicher Status	Mittlerer Abstand
Vollzeit/in berufl. Ausbildung	2.4
Teilzeit	3.6
Schüler/Studenten	2.5
Hausfrauen/Arbeitslose/Rentner	3.7

Tabelle 1.4: *Mittlere Abweichung der werktäglichen Aktivitätsmuster vom Referenztag [52, Tabelle 36, S. 78].*

Ein anderes Bild ergibt die Variation der Zeitbudgets, gemessen als Mittelwerte der absoluten Abweichungen vom Durchschnitt (Tabelle: 1.5). Die Werte sind alle größer als eine Stunde, abgesehen von der Variation des Budgets von Hausfrauen/Arbeitslosen/Rentnern für Pflichtaktivitäten.

Beruflicher Status	Mittlerer Abstand für fakultative Aktivitäten [min]	Mittlerer Abstand für Pflichtaktivitäten [min]
Vollzeit/in berufl. Ausbildung	51.2	78.4
Teilzeit	67.5	84.0
Schüler/Studenten	58.4	64.8
Hausfrauen/Arbeitslose/Rentner	77.3	10.3

Tabelle 1.5: *Mittlere Abweichung des Budgets für Pflichtaktivitäten und fakultative Tätigkeiten nach beruflichem Status [52, S. 88].*

Diese Werte lassen sich vergleichen mit der interpersonellen Variation. Sie ist für fakultative Aktivitäten um das 1.3-fache (Hausfrauen/Arbeitslose/Rentner) bis um das 1.5-fache (Vollzeitbeschäftigte) größer. Bei den Pflichtaktivitäten sind die Unterschiede noch deutlicher: Das Verhältnis beträgt hier zwischen 2.0 bei Schülern/Studenten und 2.5 bei Vollzeitbeschäftigten. Betrachtet man alle Personen, so ist das Verhältnis 4.3. Lipps [52] sieht in diesem deutlich höheren Wert eine Bestätigung für die „hohe Diskriminierung des beruflichen Status“.

Die Variationen der Anfangszeit des Hauptausgangs liegen zwischen 40.5 Minuten und 137.0 Minuten für Schüler/Studenten, bzw. Hausfrauen/Arbeitslose/Rentner. Das Verhältnis der interpersonellen zu intrapersoneller Variation liegt zwischen 1.1 für Hausfrauen/Arbeitslose/Rentner und 1.8 für Schüler/Studenten und Vollzeitbeschäftigte.

In einer Varianzanalyse wurde nun die Bedeutung verschiedener Merkmale der Personen und der Haushalte für die Variation in den Aktivitätsketten untersucht. Als unabhängige Variablen wurden betrachtet: Haushaltsgröße, Pkw-Besitz, Alter, Schulabschluß, Beruflicher Status, Geschlecht, Anzahl der Kinder unter 10 Jahren im Haushalt, Verkehrsmitteltyp, Siedlungstyp (BIK-Typ)<sup>1</sup> und Einwohnerzahl der Gemeinde. Der Anteil der Varianz, der auf die berufliche Stellung zurückgeführt werden kann, ist im Vergleich zu den anderen Variablen mit Abstand am größten. Siedlungstyp und Einwohnerzahl haben fast immer die geringste Erklärungskraft. Das gleiche Bild ergibt sich für die wichtigsten Verkehrsverhaltensindikatoren: Wegeanzahl, Entfernungsleistung, Mobilitätszeitbudget, Aktivitätszeitbudget und Anteil der MIV-Wege. Wieder haben Siedlungstyp und Einwohnerzahl der Gemeinde überwiegend kleine F-Werte<sup>2</sup>. Wenn Personen, die in unterschiedlichen Raumtypen leben, *ceteris paribus* ein ähnliches Verhalten zeigen (hier in Bezug auf die Variationen in den Aktivitätsmustern, Zeitbudgets und in Bezug auf Kenngrößen des Verkehrsverhaltens), dann läßt sich eine Übertragung von entsprechenden Modellen auf andere Untersuchungsgebiete rechtfertigen.

Da ein beträchtlicher Teil der Testpersonen mehrmals an der Panelbefragung teilnimmt, läßt sich im Prinzip untersuchen, wie Menschen auf die Veränderung ihrer Lebenssituation reagieren. Eine solche Untersuchung wird am Beispiel des Arbeitszeitmodells und zwar dem Wechsel von Vollzeit zu Teilzeit vorgestellt. Da solche Wechsel aber recht selten sind, ist die Stichprobe für diese Untersuchung sehr klein, und es lassen sich keine eindeutigen Schlüsse ziehen, auch wenn die Veränderungen für einzelne Variablen darauf hindeuten, daß es einen Antizipations- und einen Verzögerungseffekt gibt. So ist zum Beispiel das Budget für Pflichtaktivitäten vor dem Wechsel im Mittel kleiner als der Mittelwert für die Vollzeitbeschäftigten insgesamt, nach dem Wechsel aber größer als der Mittelwert für die Teilzeitbeschäftigten insgesamt.

Anhand des Schemas für das maßgebliche Aktivitätenmuster wird ein Simulationsmodell entwickelt, das für die Bevölkerung des betrachteten Untersuchungsgebietes Ak-

---

<sup>1</sup>“Die BIK-Regionen und Verflechtungsgebiete sind eine bundesweite räumliche Gliederungssystematik, die die Stadt-Umland-Beziehungen auf Gemeindeebene für Ballungsräume, Stadtregionen, Mittel- und Unterzentren darstellt.” [54].

<sup>2</sup>Zur Varianzanalyse siehe [3].

tivitätenketten sowie Anfangs- und Endzeitpunkte der Ausgänge liefert: Es wird zunächst der Hauptaussgang (zweiter maßgeblicher Ausgang) mit allen seinen Ausprägungen simuliert, dann der dritte, der vierte und schließlich der erste maßgebliche Ausgang. Entsprechend den Ergebnissen der Varianzanalyse zur Bestimmung der wichtigsten Variablen für die Verhaltensvariation und Kenngrößen des Verkehrsverhaltens werden die Personen nur nach beruflichem Status und nach Alter unterschieden. Die Reihenfolge für die Simulation der Verhaltenskomponenten eines Ausganges ist festgelegt: Hauptaktivität, Anzahl der Wege, Abfahrtszeit, Endzeit, Hauptverkehrsmittel, Wegekette. Welche der schon bestimmten Indikatoren für die Ausprägung der jeweiligen zu simulierenden Komponente berücksichtigt wird, wird je nach Skalenniveau durch  $\chi^2$ -Tests oder F-Tests ermittelt. So hängt zum Beispiel die Hauptaktivität des dritten und des ersten maßgeblichen Ausganges von der Hauptaktivität des Hauptausses ab, die Hauptaktivität des vierten maßgeblichen Ausganges jedoch von der Hauptaktivität des dritten maßgeblichen Ausganges.

In der simulierten Stichprobe ergaben sich 107 unterschiedliche maßgebliche Muster, während die Originalstichprobe 132 unterschiedliche Muster enthält. Die Zahl der unterschiedlichen Aktivitätenketten ist allerdings mit 5192 in der Simulation größer als in der Erhebung mit 1027 Aktivitätenketten. Als Beispiel für eine Anwendung wird das Szenario einer Arbeitszeitverkürzung vorgestellt. Tage mit kürzerer, bzw. längerer Arbeitszeit werden mit dem Referenztag verglichen, um die Auswirkungen einer solchen Maßnahme abzuschätzen. So wird zum Beispiel ausgewertet, welche Anteile der freigewordenen Zeit für andere Aktivitäten zuhause, beziehungsweise für Aktivitäten außer Haus genutzt werden.

Die von Lipps [52] entwickelte Verdichtung auf vier maßgebliche Ausgänge liefert eine sinnvolle Strukturierung von Tagesabläufen. Die zunächst willkürlich erscheinende Hierarchie der Aktivitäten für die verschiedenen Personengruppen erfährt nachträglich eine Rechtfertigung durch das große Zeitbudget, das die Hauptausses haben. Für einige Zwecke scheint die Verdichtung zu maßgeblichen Mustern zu grob zu sein, zum Beispiel beim Vergleich von Personentagen, wo durch das häufige Fehlen von weiteren maßgeblichen Ausgängen die Hauptaktivität zum einzigen Kriterium des Vergleichs wird. Also hängt das Ergebnis des Vergleichs sehr stark vom Schema der Verdichtung ab. Für die Bestimmung von Variationen in den zeitlichen Aspekten werden nur die Anfangs- und die Endzeiten des Hauptausses berücksichtigt. Mit nur vier Kategorien für den beruflichen Status ist auch hier die Beschreibung relativ grob.

Interessant ist die Möglichkeit, mit den Daten des Panels die intrapersonelle Variation mit der interpersonellen Variation zu vergleichen, weil sich dadurch Anhaltspunkte

ergeben, wie fein verschiedene Bevölkerungsgruppen unterschieden werden müssen. Die Frage ist hier, wo es nicht mehr sinnvoll ist, weiter zu untergliedern, weil die intrapersonelle Variation schon so groß ist, daß sie Variationen, die auf weitere beschreibende Merkmale zurückzuführen wären, überdeckt.

Das grobe Schema des maßgeblichen Musters wirkt sich auch auf die Simulation aus. Die große Zahl der unterschiedlichen Aktivitätenmuster in der Simulation im Vergleich zur Zahl der unterschiedlichen Aktivitätenmuster in der Erhebung könnte darauf hindeuten, daß das Verfahren Kopplungen zwischen den Aktivitäten nicht erfaßt. Allerdings ist es gelungen, ein Schema zu entwickeln, das alle relevanten Aspekte für die Verkehrsnachfragemodellierung einschließt und konsequent auf empirisch gestützte Zusammenhänge zurückgreift.

### Formulierung der Wahrscheinlichkeit für einen Tagesplan als Produkt bedingter Wahrscheinlichkeiten

Kitamura *et al.* [46] stellen einen sequentiellen Modellansatz vor, bei dem die Aspekte einer jeden Fahrt bezogen auf den bisherigen Verlauf des Tages bestimmt werden. Das Aktivitäts-Mobilitäts-Muster der Person  $i$  ist hier eine Folge von Aktivitäten und Fahrten:

$$(\mathbf{X}_i, \mathbf{T}_i, \mathbf{L}_i, \mathbf{M}_i) = (X_{i0}, X_{i1}, \dots, X_{in}; T_{i0}, T_{i1}, \dots, T_{in}; \\ L_{i0}, L_{i1}, \dots, L_{in}; M_{i0}, M_{i1}, \dots, M_{in})$$

wobei:

$X_{ij}$  = Aktivität (oder Aktivitätenbündel) an der Position  $j$  des Tages für die Person  $i$ .

$T_{ij}$  = Dauer der Aktivität  $j$

$L_{ij}$  = Ort der Aktivität  $j$

$M_{ij}$  = Verkehrsmittel, mit dem Person  $i$  den Ort der Aktivität  $j$  erreicht.

$n$  = Zahl der Aktivitäten im Tagesmuster der Person  $i$ .

Es wird angenommen, daß sich das Aktivitätenmuster von Tag zu Tag ändert, daß die Variationen zufällig sind und jedes Muster mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auftritt. Diese Wahrscheinlichkeit wird aus Erhebungsdaten ermittelt und in einer Monte

Carlo Simulation für die Erzeugung synthetischer Tagesmuster verwendet. Die Wahrscheinlichkeit für ein Muster läßt sich schreiben als:

$$\begin{aligned}
 P[\mathbf{X}, \mathbf{T}, \mathbf{L}, \mathbf{M}] &= P[X_0, X_1, \dots, X_n; T_0, T_1, \dots, T_n; L_0, L_1, \dots, L_n; M_0, M_1, \dots, M_n] \\
 &= P[X_n, T_n, L_n, M_n | X_0, X_1, \dots, X_{n-1}; T_0, T_1, \dots, T_{n-1}; \\
 &\quad L_0, L_1, \dots, L_{n-1}; M_0, M_1, \dots, M_{n-1}] \\
 &\quad \cdot \dots \cdot P[X_0, T_0, L_0, M_0]
 \end{aligned}$$

Die einzelnen Aktivitäten werden zusammen mit den entsprechenden Wegen der Reihe nach ermittelt, und die schon im Tagesprogramm auftretenden Aktivitäten bestimmen die Auswahl der nächsten Aktivität. Initiiert wird der Prozeß durch ein Modell für den Ort von Schule und Arbeitsplatz, soweit erforderlich, und durch Modelle zur Wahl des Zeitpunktes der ersten Fahrt und des Ausgangsortes. Die Auswahl der Attribute der aktuellen Aktivität werden ebenfalls der Reihe nach bestimmt und zwar für Fahrten, die zu Hause beginnen, in der Reihenfolge: Aktivitätentyp, Dauer, Ort und Verkehrsmittel. Für Fahrten, die nicht zuhause beginnen, sind die Positionen von Verkehrsmittelwahl und Ort der Ausübung vertauscht.

Die allgemeine Formulierung ist zu ergänzen durch Vereinfachungen in den Einzelmodellen: Bei der Wahl des Aktivitätentypes werden nicht alle früher eingeplanten Aktivitäten berücksichtigt. In die Auswahl geht nur ein, ob eine Aktivität des jeweils in Betracht gezogenen Typs schon vorkam. Bei *persönlichen Erledigungen* erhöht sich zum Beispiel die Wahrscheinlichkeit für eine wiederholte Ausübung; bei *Einkaufen*, *geselligen Aktivitäten* und *Erholungsaktivitäten* ist die Wiederholung weniger wahrscheinlich. In die Wahl des Ortes gehen Eigenschaften der Person, des Haushalts, sowie soziodemographische Merkmale und Flächennutzungsmerkmale der möglichen Zielzonen ein, ebenso die Dauer der geplanten Aktivität, die Tageszeit und der Wohnort. Die bisherige Planung wird nur durch den Ort der letzten Aktivität einbezogen. In ähnlicher Weise basiert die Verkehrsmittelwahl auf einer Matrix der Verkehrsmittelwechsel.

Die Validierung des Modells anhand von Daten der SCAG (*Southern California Association of Governments*) lieferte zufriedenstellende Ergebnisse. Das Zeitbudget für *Arbeiten* und *Schule* wurde vor allem nachmittags vergleichsweise oft falsch eingeschätzt. Die Autoren führen das darauf zurück, daß feste Arbeits- und Schulzeiten nicht explizit in das Modell eingehen. Die Zahl der Fahrten von zuhause aus werden unterschätzt, während die Zahl der anderen Fahrten deutlich überschätzt wird. Auch das geht darauf zurück, daß die Tagesmuster von Erwerbstätigen im Modell komplexer sind als in der



Erhebung.

Der sequentielle Modellansatz besticht durch einen klaren Aufbau, und durch die Parameter der Teilmodelle läßt sich eine Vielzahl von Einflüssen auf das Verkehrsgeschehen untersuchen. Allerdings wird prinzipiell vernachlässigt, daß die Wechselwirkung zwischen Aktivitäten nicht von früheren Aktivitäten auf spätere beschränkt ist. Da Menschen ihre Aktivitäten im voraus planen, nehmen sie bei der Ausübung von zeitlich früher gelegenen Aktivitäten Rücksicht auf die folgenden. So kann eine Freizeitaktivität am Abend dazu führen, daß die Arbeitszeit im Tagesverlauf nach vorne verschoben oder verkürzt wird.

## 1.4 Nutzenmaximierungsmodelle

Arentze und Timmermans [2] sehen in der Anwendung des Konzepts der Nutzenmaximierung auf die Modellierung von Verkehrsnachfrage eine Gegenbewegung zu den *constraints based*-Modellen. In den Nutzenmaximierungsmodellen wird stärker betont, daß das Individuum trotz aller Zwänge und Einschränkungen eine Wahlfreiheit hat. Der Nutzenmaximierungsansatz hat in der Ökonomie weite Verbreitung gefunden. Er ist vielfältig einsetzbar, und es besteht ein ausgereifter statistisch-mathematischer Apparat, um Modelle entsprechend dieser Theorie zu formulieren. Die sogenannten *discrete choice*-Modelle gehen davon aus, daß die Alternativen durch eine Reihe von Attributen beschrieben sind. Aus dem Wert der Attribute und den Präferenzen des Individuums ergibt sich der Nutzen der Alternative für das Individuum. Die Präferenzen des Individuums können auch negativ sein, so daß Attribute die Attraktivität einer Alternative mindern, zum Beispiel Kosten. Meistens wird der Nutzen als eine Linearkombination der Attribute formuliert. Die Spezifikation des Modells besteht nun darin, die Koeffizienten der Attribute in Abhängigkeit von Eigenschaften der Person und möglicherweise weiterer Randbedingungen zu schätzen. Dabei wird unterstellt, daß dem Individuum bei der Messung der Werte der Attribute Fehler unterlaufen oder daß es persönliche Vorlieben gibt, die in der betrachteten Menge von Attributen nicht vorkommen. Je nach der Verteilung dieser Fehler ergeben sich verschiedene Funktionen für die Wahrscheinlichkeit, daß ein Individuum eine bestimmte Alternative wählt. Man erhält ein Logit-Modell, wenn die Gumbel<sup>3</sup>-Verteilung für die Fehlerterme angenommen wird, und ein Probit Modell für die Gauß<sup>4</sup>-Verteilung. Logit-Modelle sind einfacher zu handhaben, Voraussetzung ist je-

---

<sup>3</sup>Emil Julius Gumbel, \* 1891 in München, † 1960 in Berlin

<sup>4</sup>Carl Friedrich Gauß, \* 1777 in Braunschweig, † 1855 in Göttingen

doch, daß die Alternativen im betrachteten Kontext voneinander unabhängig sind. Wenn dies nicht der Fall ist, kann man sich damit behelfen, korrelierte Alternativen in einem gesonderten Schritt zu behandeln. Das führt zu einer hierarchischen Entscheidungsstruktur (engl.: *nested logit*).

Solch ein Modellsystem wenden Bowman und Ben-Akiva [9] auf die Verkehrsnachfrage an. Der Ausgangspunkt der Modellierung ist der aktivitätenbasierte Ansatz, den sie zu zwei grundlegenden Ideen zusammenfassen, indem sie sich auf Jones [42] und Hägerstrand [34] beziehen.

First, the demand for travel is derived from the demand for activities. Travel causes disutility and is only undertaken when the net utility of the activity and travel exceeds the utility available from activities involving no travel. Second, humans face temporal-spatial constraints, functioning in different locations at different points in time by experiencing the time and cost of movement between the locations. They are also generally constrained to return to a home base for rest and personal maintenance [9].

Die Aufgabe des Modellsystems ist die Auswahl eines Tagesplans (*schedule*), der sich aus verschiedenen Touren zusammensetzt. Ein wesentlicher Punkt im Vergleich zu tourenbasierten Modellen ist die Auswahl eines Musters (*pattern*), das die Wahrscheinlichkeit für die Auswahl der Touren bestimmt:

$$p(\text{schedule}) = p(\text{pattern}) p(\text{tours}|\text{pattern})$$

Ein Muster ist mindestens gekennzeichnet durch

- eine primäre Aktivität, wobei eine Alternative darin besteht, alle Aktivitäten zuhause auszuführen,
- den Typ der Tour für die primäre Aktivität, einschließlich der Zahl, des Zwecks und der Abfolge von weiteren Halten,
- die Zahl und den Zweck sekundärer Touren.

Die Entscheidung über eine Tour schließt die Wahl des Ortes für jede Aktivität, die Tageszeit und das Verkehrsmittel ein.

Das Modellsystem ist in einem Prototyp umgesetzt worden. Das Untersuchungsgebiet ist Boston, Massachusetts an der Ostküste der USA. Die Datengrundlage bildete unter anderem die Erhebung eines 24 Stunden-Wegetagebuchs. Wie in Abbildung 1.4 gezeigt, wurden die Entscheidungsstufen gegliedert in:

- Aktivitätsmuster,
- Tageszeit der Haupttour,
- Ziel der Hauptaktivität und Verkehrsmittel, um es zu erreichen,
- Tageszeit der sekundären Touren,
- Ziele und Verkehrsmittel der sekundären Touren.

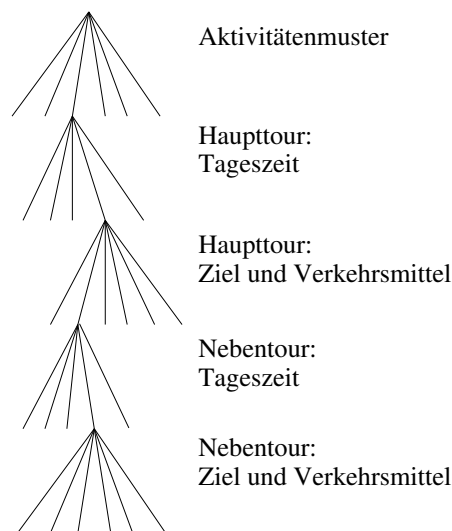


Abbildung 1.4: Hierarchie des Tagesplans. Die Auswahl in unteren Stufen ist bedingt durch die Entscheidungen auf höheren Stufen nach [9].

Die Unterscheidung in eine Haupttour und sekundäre Touren wird anhand der Aktivitäten getroffen, die in den Touren vorkommen. Das bedeutet, daß es Prioritäten für die Aktivitäten geben muß. In der Erhebung wurden Prioritäten nicht erfaßt, so daß eine deterministische Regel angewendet wurde. In der ausgewählten Regel hat *Arbeit* die höchste Priorität gefolgt von *auf die Arbeit bezogenen Aktivitäten*, *Schule* und *andere Aktivitäten*. Bei nicht entscheidbaren Situationen wird die Aktivität mit der längeren Dauer als die wichtigere eingestuft. Die Priorität wird auf Touren übertragen, indem diejenige Tour die höchste Priorität erhält, in der die Aktivität mit der höchsten Priorität vorkommt.

Die Stufe zur Auswahl des Aktivitätsmusters ist in sich nochmal gegliedert: Es wird entschieden, ob der Tagesplan überhaupt Touren enthalten soll oder nicht. Wenn Touren vorkommen, wird in der zweiten Stufe eines von 54 Mustern ausgewählt. Die Muster legen den Zweck und den Typ der Haupttour fest sowie die Zahl und die Aktivitäten der

sekundären Touren. Die Zwecke der Haupttour sind: *Arbeit*, *Schule* und *andere*. Die Tourtypen werden unterteilt nach einfachen Touren, wo nur ein Ziel außer Haus aufgesucht wird, und komplexen Touren, die mehr als ein Ziel enthalten. Bei den Touren mit dem Zweck *Arbeit* gibt es außerdem die Alternative, vom Arbeitsplatz aus eine Zwischen-tour zu unternehmen, wobei das Ziel der Zwischentour auch die Wohnung sein kann. In solchen Touren können wiederum weitere Stationen eingeschlossen sein oder auch nicht.

Das Prinzip der Wahl der Tageszeit ist für die Haupttour und die sekundären Touren gleich. Es wird jeweils für die Abfahrt und die Ankunft eines von vier Zeitfenstern gewählt, so daß 16 Alternativen zu unterscheiden sind. Die Dauer der Tour ergibt sich implizit durch das Ergebnis dieses Auswahlsschrittes. Die Zeitfenster sind:

Vormittagsspitze	6:30 Uhr – 9:29 Uhr
Mittagszeit	9:30 Uhr – 15:59 Uhr
Nachmittagsspitze	16:00 Uhr – 18:59 Uhr
restliche Zeit	19:00 Uhr – 6:29 Uhr

Die Zielwahl und Verkehrsmittelwahl werden als multinomiale Logit-Modelle mit Stichproben für die Alternativenmenge geschätzt. Für jede Tour wird eine Stichprobe mit 48 Alternativen generiert nach einem gewichteten Verfahren. Die Alternativen ergeben sich aus acht von 786 möglichen geographischen Zonen in Kombination mit bis zu sechs verschiedenen Verkehrsmitteln für jede Zielzone. Bei der Verkehrsmittelwahl wird nach gesonderten Regeln festgelegt, welche Verkehrsmittel von welchen Personen genutzt werden können.

Einer der Vorteile des Nutzenmaximierungsansatzes ergibt sich daraus, daß er sehr allgemein formuliert ist. Dadurch ist das Verfahren offen für die Modellierung einer jeden Einflußgröße, für die ein sinnvolles Maß gefunden werden kann. Zusätzlich zur inhaltlichen Flexibilität sind die Prognosen prinzipiell nicht auf Konstellationen beschränkt, die es schon gibt. Der Ansatz läßt auch Extrapolationen auf Situationen zu, in denen die Attribute der Alternativen Werte außerhalb des beobachteten Bereichs annehmen.

Die Autoren betonen, daß das Modellsystem alle Aspekte der Verkehrsnachfrage einschließt und im Gegensatz zu anderen Modellkonzeptionen nicht auf exogene Schätzungen wichtiger Aspekte der Aktivitäts- und Fahrtenplanungsentscheidungen, zum Beispiel die Auswahl der Aktivitäten, der Orte oder der Verkehrsmittel zurückgreifen muß. Die Implementierung des Prototypen hat gezeigt, daß der Datenbedarf des Modells befriedigt werden kann. Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Anwendbarkeit in der Praxis ist der Rechenaufwand sowie die Anforderungen an Soft- und Hardware. Bei der Kon-

zeption der Modellstruktur wurde das explizit berücksichtigt, denn die Parameterschätzung sollte mit kommerziell erhältlicher Software bewältigt werden können.

Trotz des allgemeinen Charakters des Ansatzes der Nutzenmaximierung müssen bei der Modellformulierung Einschränkungen gemacht werden, die erheblichen Einfluß auf die Sensitivität und die Qualität der Prognosen haben. Eine wesentliche Festlegung ergibt sich aus der Auswahl der Alternativenmenge. Dieser Schritt ist deshalb wichtig, weil hier die Restriktionen und Zwänge formuliert werden, denen der Auswahlprozeß unterworfen ist. Die Autoren weisen außerdem darauf hin, daß die Unterscheidung der Alternativen recht grob ausgefallen ist. Das betrifft die Zwecke von Aktivitäten, Tourtypen, die Zwecke sekundärer Touren, die nicht konsistent sind mit den Zwecken primärer Touren, die Verkehrsmittel, wo nur wenige multimodale Varianten vorkommen, die Zielwahl mit der traditionellen Aggregation auf Zonen und die vier Zeitzonen für die Tageszeit. Letzteres macht es schwierig, den Einfluß von verlängerten Reisezeiten bei hoher Belastung des Verkehrsnetzes richtig abzubilden. Vor allem die Verfeinerung der Zeitzonen ist nicht nur ein Problem des Rechenaufwands. Erstens erscheint die Formulierung in einem Logit-Modell problematisch, da die Alternativen nicht als unkorreliert betrachtet werden können, zum andern wächst bei einer Verfeinerung der Kategorien für jeden Teilaspekt die Zahl der Gesamtalternativen exponentiell. Man stößt bei der Schätzung der Koeffizienten dann nicht nur an Grenzen der Rechenleistung, sondern es bedarf auch einer viel größeren Datenbasis, so daß jede der Einzelalternativen noch mit genügend Fällen vertreten ist. Diese Schwierigkeit zeigt sich wieder, wenn man die für die Autoren unbefriedigende Annahme lockern will, daß sekundäre Touren unabhängig voneinander bewertet werden. Um dies zu vermeiden, muß man weiter in Touren dritten und vierten Rangs gliedern, wodurch die Zahl möglicher Kombinationen wiederum sehr groß werden kann.

Die Zunahme der Komplexität macht es darüberhinaus schwieriger, von der sequentiellen Schätzung zu einer simultanen Schätzung der Koeffizienten überzugehen. Die Koeffizienten der sequentiellen Schätzung sind nach Aussage der Autoren zwar konsistent, weichen aber von den Ergebnissen der simultanen Schätzung ab, und die Schätzungen für die Standardabweichungen der Koeffizienten sind nicht konsistent.

## 1.5 Entscheidungsprozeßmodelle (computational process models)

Wie bei den anderen Modellklassen sollen auch hier Beispiele verdeutlichen, wie ein Entscheidungsprozeßmodell konzipiert und umgesetzt werden kann. ALBATROSS steht für *A Learning Based Transportation Oriented Simulation System*. Es handelt sich um ein Modell, dessen Konzeption die Potentiale eines Entscheidungsprozeßmodells gut wiedergibt. Es ist weitgehend umgesetzt worden, es wurde gezeigt, wie das Konzept mit Erhebungsdaten zu verknüpfen und zu validieren ist, und es existiert eine umfassende Dokumentation [2].

Das zweite Beispiel ist das Modell AVENA. Es ist in einem Projekt des Landes Nordrhein-Westfalen mit Köln als Testfeld weiterentwickelt und erprobt worden. In der Konzeption wird der Anspruch auf eine Erklärung des Mobilitätsverhaltens betont.

### ALBATROSS

Das Modell basiert auf der Annahme, daß Aktivitätenmuster nicht als Manifestation eines optimalen Entscheidungsprozesses angesehen werden können. Vielmehr sind sie das vorläufige Ergebnis eines Lernprozesses. Es wird angenommen, daß Menschen heuristische Prinzipien entwickeln, nach denen sie auswählen.

Einige wichtige Schlüsselbegriffe spielen im Modellkonzept eine besondere Rolle: Die Attraktivität von *Orten* ist durch die Werte verschiedener Attribute gegeben. Eine Person kennt nicht alle möglichen Orte für die Ausübung einer Aktivität, sondern hat vielmehr ein eigene *kognitive Umgebung*. Die kognitive Umgebung ist nicht konstant, sondern kann sich mit der Zeit verändern. Die Wahl von Aktivitäten findet in einem *institutionellen Kontext* statt. Dazu gehören Arbeitszeiten, Ladenöffnungszeiten oder die Tatsache, daß man erst im Alter von 18 Jahren einen Pkw-Führerschein erwerben kann.

Die Aktivitäten, die im Laufe eines Tages stattfinden können, werden *Episoden* genannt. Eine Episode enthält eine frühestmögliche Anfangszeit, eine Dauer und eine späteste Zeit, zu der sie endet. Informationen darüber, wann welche Aktivitäten an welchem Ort ausgeübt werden können, sind Teil des institutionellen Kontextes. Eine *Fahrt* verbindet zwei Orte, eine Fahrtenkette ist eine Folge von Fahrten, die zuhause beginnt und zuhause endet. Auch der einfachste Fall, bei dem nur ein Ziel aufgesucht wird, wird als Fahrtenkette bezeichnet. Der *Aktivitätenkalender* ist die Menge aller Aktivitäten, die eine Person in einem bestimmten Zeitraum ausführen soll. Ein Aktivitätenkalender kann sich

aber auch auf einen ganzen Haushalt beziehen. Aktivitäten werden danach unterschieden, ob sie verpflichtend oder nicht verpflichtend sind und ob sie zuhause stattfinden oder andernorts. Darüberhinaus können für Aktivitäten zeitliche Einschränkungen bestehen. So kann es eine tägliche, wöchentliche oder monatliche Mindest- und Höchstdauer geben.

Aus dem Aktivitätenkalender werden für einen bestimmten Tag Aktivitäten ausgewählt. Diese Auswahl heißt *Aktivitätenprogramm*. Werden in einem Aktivitätenprogramm die Zeiträume für die Aktivitäten festgelegt, erhält man einen *Zeitplan* (engl. *activity schedule*). Dieser kann sich durch unvorhergesehene Aktivitäten oder wegen Aktivitäten, die doch nicht ausgeführt werden können, noch verändern. Die Aktivitäten, die tatsächlich ausgeführt wurden, bilden das *Aktivitätenmuster* (engl. *activity pattern*). Es legt Ort, Art der Aktivität, Verkehrsmittel, Zeit und Dauer und beteiligte Personen fest.

Das Modellierungsproblem ist also die Bestimmung eines Aktivitätenmusters als Funktion des Aktivitätenkalenders, der kognitiven Umgebung, der Verfügbarkeit von Verkehrsmitteln, der Flächennutzung und des institutionellen Kontextes. Die Entstehung von Verkehrsnachfrage wird aufgefaßt als ein Prozeß, in dem Personen ihre Zeit und ihre Aktivitäten planen innerhalb eines gegebenen Zeitraums, in einem bestimmten Haushalt, unter Beachtung von räumlichen und zeitlichen Zwängen, und um bestimmte Ziele zu erreichen. Es wird postuliert, daß über die Teilnahme an Aktivitäten, ihre Verteilung und Durchführung grundlegend auf der Ebene von Haushalten entschieden wird. Denn auf dieser Ebene ergibt sich, welche Aktivitäten notwendig sind, und auf dieser Ebene wird entschieden, welche Aktivitäten durchgeführt werden. Die Erzeugung und Umsetzung von Aktivitätenkalendern, -programmen und -zeitplänen umfaßt mehrere Zeitskalen.

Zu den langfristigen Entscheidungen zählen zum Beispiel die Zusammensetzung des Haushalts und der Familienstand der Mitglieder. Solche Entscheidungen sind entweder unwiderrufbar oder es dauert Jahre, bis sich hier Änderungen ergeben. Aus ihnen leitet sich aber ab, welchen Zwängen die Mitglieder eines Haushalts ausgesetzt sind, und welche Aktivitäten die Haushaltsmitglieder ausüben. Weitere langfristige Entscheidungen betreffen den Wohnort, die Wahl des Arbeitsplatzes, die Anschaffung von Fahrzeugen oder den Erwerb von Abonnements des öffentlichen Nahverkehrs. Solche Entscheidungen bleiben in der Regel auch für längere Zeit wirksam, auch wenn sie im Prinzip kurzfristig zu ändern sind.

Die langfristigen Festlegungen haben einen entscheidenden Einfluß auf den Aktivitätenkalender, also auf das Repertoire von Aktivitäten, die im Haushalt vorkommen. Die Mitglieder des Haushalts handeln aus, wie die Aufgaben unter ihnen aufgeteilt werden. Die Aufteilung hängt von geschlechterspezifischen Rollen und der jeweils verfügbaren

Zeit ab. Andererseits aber auch von der Art, dem Verpflichtungsgrad und der Dringlichkeit der Aktivitäten.

Sobald das Aktivitätenprogramm aufgestellt ist, besteht der nächste Schritt darin, einen Zeitplan zu entwerfen. Dabei sind die Orte festzulegen, wo Aktivitäten stattfinden sollen, die Menschen, die daran beteiligt sind, und die Verkehrsmittel, um die Orte zu verbinden.

In diesem Prozeß versucht die Person, bestimmte Ziele zu erreichen, wobei etliche Randbedingungen berücksichtigt werden müssen. Diese Bedingungen schränken die Zahl möglicher Aktivitätenmuster ein.

- *logische Bedingungen:* Manche Aktivitäten sind nur in bestimmten Zeiträumen sinnvoll. So ist zum Beispiel ein Frühstück um Mitternacht nicht sehr wahrscheinlich.
- *institutionelle Zwänge:* zum Beispiel Öffnungszeiten
- *Verpflichtungen durch den Haushalt:* Die Aufgabe, Kinder zur Schule zu bringen, macht es unmöglich, zu einer bestimmten Zeit etwas anderes zu tun.
- *räumliche Einschränkungen:* Bestimmte Aktivitäten können an bestimmten Orten nicht stattfinden.
- *zeitliche Einschränkungen:* Manche Aktivitäten haben eine Minstdauer, und die insgesamt verfügbare Zeit kann die Ausübung von Freizeitaktivitäten einschränken.
- *räumlich-zeitliche Einschränkungen:* Das Zusammenspiel von institutionellen Rahmenbedingungen, die kognitive Vorstellung der Person von ihrer Umgebung und die verfügbaren Verkehrsmittel kann dazu führen, daß die Person nicht zur rechten Zeit am gewünschten Ort sein kann, um einer Aktivität nachzugehen.

Die nächste Frage ist, wie Menschen unter möglichen Aktivitätenmustern auswählen. Im Unterschied zu Nutzenmaximierungsmodellen wird postuliert, daß sich Aktivitätenmuster in einem Lernprozeß entwickeln. Eine Person in einer ihr unbekannten Stadt wird nach der ein oder anderen Strategie nach Hotels oder Gaststätten und bestimmten Geschäften suchen. Die Suche wird beendet, sobald Orte gefunden sind, die den Anforderungen der Person genügen. Die Person setzt die Suche fort, wenn sie neue Bedürfnisse hat oder aus Neugier, je nachdem ob sie Risiken sucht oder lieber vermeidet.



Es wird angenommen, daß dieses Suchverhalten in Vorlieben für bestimmte Orte, Zeitpunkte und Verkehrsmittel mündet. Diese Vorlieben leiten die Entscheidungsfindung bei der Zusammenstellung durchführbarer Zeitpläne. Weiter wird angenommen, daß Menschen Skripte entwickeln, welche Heuristiken enthalten, die bestimmen, wo eine Aktivität vorzugsweise ausgeübt wird und wie der Ort erreicht wird. Eine Heuristik kann besagen: „Wähle den nächstgelegenen Ort.“ oder: „Wähle den Ort, der der Wohnung am nächsten liegt.“ oder: „Wähle das größte Kaufhaus.“ Die Heuristiken beschreiben zusammengenommen ein Verhalten, das nur bedingt auf Veränderungen reagiert. Auch bei Veränderungen werden Menschen zunächst an allgemeinen Vorgehensweisen festhalten.

Das Problemlösungsverhalten ist dadurch gekennzeichnet, daß die Menschen versuchsweise Lösungen im Geiste ausprobieren, um festzustellen, ob sich durch Vorentscheidungen Konflikte für eine Umsetzung innerhalb der vorgefunden Umgebung ergeben. Befriedigende Lösungen werden sich verfestigen und mit Gewohnheiten kombiniert werden.

Bei der Umsetzung ihrer Zeitpläne sind die Menschen zum Beispiel durch die Verkehrsbedingungen direkt oder indirekt mit den Entscheidungen anderer Menschen konfrontiert. So kann es nötig werden, das Aktivitätenmuster an unvorhergesehene Bedingungen anzupassen. Es wird angenommen, daß Menschen also ständig mit der Frage konfrontiert sind, ob das Aktivitätenmuster geändert werden muß oder nicht. Die Anpassung des Verhaltens spielt sich daher mindestens auf zwei Zeitskalen ab. Langfristig prägen sich neue Verhaltensregeln aus, kurzfristig werden Alternativen im Geiste durchgespielt und allgemeine Regeln an die Situation angepaßt. Beide Prozesse, Lernen und Problemlösung, werden angestoßen durch Konflikte oder neue Möglichkeiten, die sich durch ungeplante Ereignisse oder strukturelle Änderungen in der Umgebung ergeben.

Bei der Umsetzung des Modellkonzepts in einem regelbasierten System können Regeln auf verschiedene Art und Weise formuliert werden: als Produktionssystem, als boolesche Logik oder als Abfrage-Sprache. Die Herausforderung besteht darin, einen Formalismus zu finden, der umfassend ist und zu eindeutigen Ergebnissen führt. ‚Umfassend‘ bedeutet, daß alle vorkommenden Fälle behandelt werden können. Außerdem sollte er eine theoretische Interpretation zulassen und die Anwendung von Lernmechanismen erlauben, um Regeln aus Aktivitätentagebüchern abzuleiten.

In ALBATROSS werden die Entscheidungen nicht simultan, sondern sequentiell abgearbeitet. Personen versuchen, ihre Vorlieben umzusetzen und beachten dabei eine Menge von explizit vorgegebenen Einschränkungen. Restriktionen wandern in solchen Systemen von Stufe zu Stufe, da vorgelagerte Entscheidungen den Spielraum für folgende Ent-



Abbildung 1.5 zeigt die Modellstruktur von ALBATROSS. Der *Planer* (engl. *scheduling engine*) ist das Herzstück der Simulation. Er stellt die Bedingungen fest, die für eine Entscheidung relevant sind, und leitet das Entscheidungsproblem an die *Entscheidungseinheit* weiter. Der Lernmechanismus ist noch nicht in den eigentlichen Planungsprozeß integriert und im Moment noch vorgelagert. Der *Planer* verarbeitet die Informationen von *Entscheidungseinheit* und *Kontrollsystem* und führt die notwendigen Veränderungen im Zeitplan durch. Das *Kontrollsystem* enthält eine Sammlung von festen logischen Regeln. So wird dort zum Beispiel sichergestellt, daß dynamische Restriktionen, die sich aus zeitlichen Überschneidungen ergeben können, eingehalten werden. Die *Datenbank* speichert die für die Planung entscheidenden Informationen über den Haushalt und die Umgebung, in der die Haushalte planen müssen. Im Moment sind das Transportsystem und das Routenwahlverhalten nicht explizit im System abgebildet. Reisezeiten werden in einem vorgelagerten Schritt für das freie Netz und für kürzeste Routen berechnet. In der *Datenbank* sind auch beobachtete und die vom Planer erzeugten Aktivitätsmuster enthalten, so daß die Daten für die Auswertung verglichen werden können.

Der *Agent zur Berichterstattung* steuert die Art der Ausgabe und die Auswertung. Dies betrifft verschiedene Bereiche: Häufigkeitsauszählungen und Kreuztabellen, Indikatoren für die Leistungsfähigkeit des Systems, Vergleich von erzeugten und beobachteten Zeitplänen und statistische Daten für die Bewertung von Szenarien nach einem mehrfachen Durchlauf des Planungsvorgangs. Der *Szenario Agent* erlaubt es dem Benutzer, dem System bestimmte Vorgaben zu liefern, zum Beispiel eine Veränderung der Bevölkerungszusammensetzung oder eine Veränderung des Verhaltens. In diesem Fall muß der Benutzer erstens angeben, wie stark verschiedene Bevölkerungssegmente reagieren werden, das heißt wie groß die Durchdringung der Maßnahme ist. Zweitens ist anzugeben, wie stark und in welcher Richtung die Verhaltensänderung verläuft. Der *Simulator* ist im Moment noch nicht implementiert. Er ist dafür vorgesehen, veränderte Reisezeiten zu liefern oder die zeitliche Entwicklung der Umgebung zu simulieren.

Es wird ein sequentieller Entscheidungsprozeß modelliert. Die Folge von Entscheidungen kann auf sehr unterschiedliche Art und Weise ablaufen und wird von den Vorlieben und Gewohnheiten der Personen abhängen. Das Modell bildet das zum Teil durch die Entscheidungsregeln in der Entscheidungseinheit ab. Zum größten Teil ist der Prozeß aber vorgegeben, um das Planungsproblem überschaubar zu halten.

Es wird unterschieden zwischen festgelegten, fixen Aktivitäten und flexiblen Aktivitäten. Fixe Aktivitäten müssen in den Zeitplan aufgenommen werden, und ihr Ort, ihre Anfangs- und Endzeit liegen fest. Für flexible Aktivitäten muß im Planungsprozeß über

die Aufnahme in den Tagesplan und die Attribute (Ort, Zeit) entschieden werden. Weiter wird für Aktivitäten der Ort der Ausübung nach Aktivitäten zuhause und Aktivitäten außer Haus unterschieden. Die festgelegten Aktivitäten des Tageplans bilden das sogenannte Skelett. Für die beweglichen Aktivitäten ist bei verschiedenen Entscheidungen eine Prioritätenreihenfolge nötig. Diese wird *a priori* festgelegt: täglicher Einkauf, Inanspruchnahme von Dienstleistungen, nicht-alltäglicher Einkauf, Besuche und Freizeit.

Die Schritte des Planungsprozesses sind im einzelnen:

1. Initialisiere den Zeitplan mit den festgelegten Aktivitäten.
2. Wähle das Verkehrsmittel für jede primäre Arbeitsaktivität.
3. Wähle flexible Aktivitäten, entscheide, ob sie in den Zeitplan aufgenommen werden, bestimme die Personen, die an der Aktivität beteiligt sind, und lege die Dauer fest.
4. Wähle für jede flexible Aktivität eines von sechs Zeitfenstern, in das der Beginn fallen soll und platziere sie entsprechend im Zeitplan.
5. Lege für jede Aktivität die Lage im Zeitplan fest und bestimme, ob sie mit anderen Aktivitäten eine Fahrtenkette bildet oder ob Aktivitäten zuhause einzusetzen sind.
6. Lege für jede Fahrtenkette das Verkehrsmittel fest.
7. Lege für jede flexible Aktivität den Ort und die Reisezeit fest.

Die Wahl des Verkehrsmittels für primäre Arbeitsaktivitäten außer Haus wird als eine vorrangige Entscheidung betrachtet, weil dadurch bestimmt wird, wem für eine lange Zeit des Tages ein Fahrzeug zur Verfügung steht oder nicht. Das hat in der Regel einen entscheidenden Einfluß auf die weitere Planung. Für die Wahl der Dauer werden Aktivitäten in kurze, mittlere und lange Aktivitäten eingeteilt. Diese Einteilung hängt von der Art der Aktivität ab. Für die Wahl des Anfangszeitpunktes werden zunächst sechs Zeitintervalle unterschieden: vor 10 Uhr, 10-12 Uhr, 12-14 Uhr, 14-16 Uhr, 16-18 Uhr, nach 18 Uhr. Es kann sein, daß die Wahl des Zeitintervalls schon die Position im Zeitplan bestimmt. Wenn das nicht so ist, wird nach der Minimax-Regel verfahren, und die Aktivität wird so eingeplant, daß für nachfolgende Aktivitäten möglichst viel Spielraum bleibt. Die Orte werden wieder in der Reihenfolge der Prioritäten gewählt.

Im Unterschied zu anderen regelbasierten Systemen, die Regeln aus Protokollen oder Experteninterviews ableiten, werden für ALBATROSS Regeln auf der Grundlage statistischer Daten gewonnen. Die Regeln werden mit Entscheidungstabellen aufgezeichnet. Eine Entscheidungstabelle verknüpft alle vorkommenden Bedingungen mit einer Aktion, die unter der gegebenen Bedingung stattfindet. Die Bedingung ist formuliert als die Kombination von Zuständen einer oder mehrerer Bedingungsvariablen. Eine Entscheidungstabelle muß konsistent, exklusiv und vollständig sein. Die Entscheidungsvariablen müssen aber keine Hierarchie aufweisen und die Partitionen für die verschiedenen Variablen können voneinander unabhängig sein. So kann es sein, daß für die Verkehrsmittelwahl bei Entfernungen unter 500 m das Parkplatzangebot keine Rolle spielt, da dann ohnehin kein Auto benutzt wird. Bei größeren Entfernungen ist das Parkplatzangebot aber ein relevantes Kriterium, zum Beispiel für die Fahrt mit dem ÖPNV.

C1	Entfernung [m]	D < 500	500 ≤ D < 1000		D ≥ 1000	
C2	Parkplatzangebot	-	schlecht	gut	schlecht	gut
A1	Fahrrad	x	x	-	-	-
A2	Automobil	-	-	x	-	x
A3	ÖPNV	-	-	-	x	-

Tabelle 1.6: Beispiel für eine Entscheidungstabelle [2, S. 109]

Regeln werden unterschieden nach Restriktionen und Präferenzen. Restriktionen haben höchste Priorität und umfassen zeitliche Einschränkungen und Einschränkungen in Bezug auf die Reihenfolge. Zeitliche Restriktionen ergeben sich daraus, daß eine Aktivität nur in einem bestimmten Zeitfenster stattfinden kann, zum Beispiel wegen Öffnungszeiten und aus dem Zeitplan, soweit er schon erstellt wurde. Im Gegensatz zu Restriktionen sind Präferenzen unterschiedlich für verschiedene Personen. Es ist nicht von vornherein klar, welche Priorität diese Vorlieben haben und was sie besagen. Sie sollen von empirischen Daten abgeleitet werden. Es werden drei Bereiche für die Anwendung solcher Regeln unterschieden: Tageszeitpräferenzen, Präferenzen für die Kombination von Aktivitäten und Präferenzen für eine bestimmte Abfolge von Aktivitäten.

Die Entscheidungstabellen werden mit Hilfe des sogenannten CHAID-Algorithmus ermittelt. CHAID steht für *chi-squared automatic interaction detector*. Dabei wird stufenweise überprüft, ob sich die Entscheidungsergebnisse für verschiedene Bedingungen signifikant nach dem  $\chi^2$ -Test unterscheiden. Das Verfahren ist in Abschnitt 2.6 ausführlicher beschrieben.

Als Datenbasis dient die Erhebung von Eigenschaften von Personen und Haushalten zusammen mit Aktivitätentagebüchern, die von den Teilnehmern der Erhebung für zwei aufeinanderfolgende Tage auszufüllen waren. In den Aktivitätentagebüchern wurden Aktivitäten einer von 48 Kategorien zugeordnet und minutengenau protokolliert. Zusätzlich war anzugeben, ob andere Personen beteiligt waren und ob diese Personen zum eigenen Haushalt gehören. Die Ortsangabe wurde als Adresse abgefragt. Der ausgewertete Datensatz besteht aus Tagebüchern von 1219 Personen.

Entsprechend den Schritten im Planungsprozeß ist die erste Entscheidung die Auswahl des Verkehrsmittels für die primären Fahrten zur Arbeit. Es werden 32 Entscheidungsvariablen berücksichtigt, und es ergeben sich 23 verschiedene Bedingungen. Für die Entscheidung über die Einplanung einer der flexiblen Aktivitäten sind die Auswahlkriterien: die Art, der Ort, die Anfangs- und Endzeit der festgelegten Aktivitäten, das Verkehrsmittel für Arbeitsfahrten und Aspekte schon eingeplanter flexibler Aktivitäten wie Art, beteiligte Personen, Anfangs- und Endzeiten der Zeitfenster. Es sind schließlich 116 Entscheidungsvoraussetzungen zu unterscheiden.

Die Entwickler von ALBATROSS formulieren das Konzept eines Entscheidungsprozeßmodells aus, definieren die Anforderungen an eine empirische Datenbasis, setzen das Modellkonzept in ein Computerprogramm um und ermitteln die notwendigen Modellparameter. Das Modell ist offen für Erweiterungen in Bezug auf das Lernverhalten von Menschen und unterstützt die Untersuchung von Szenarien. Die Autoren räumen selbst ein, daß das Computerprogramm nicht alle Aspekte des Konzepts verwirklicht. So war vorgesehen, in einem ersten Schritt die Aktivitäten innerhalb des Haushalts zu verteilen. Tatsächlich bezieht sich die Modellierung aber auf Einzelpersonen. Der Haushaltskontext fließe implizit ein, da Eigenschaften des Haushalts in den einzelnen Planungsschritten berücksichtigt werden. Auch der letzte Schritt, die Veränderung von Plänen aufgrund kurzfristiger Störungen oder sich bietender Gelegenheiten, wurde noch nicht umgesetzt.

Bei der Formulierung von Entscheidungsprozeßmodellen scheint es schwierig zu sein, auf willkürlich erscheinende Festlegungen zu verzichten. Das betrifft die Reihenfolge der Prioritäten für flexible Aktivitäten, die Zeitfenster, die bei der Auswahl flexibler Aktivitäten berücksichtigt werden, die Unterscheidung von fixen und flexiblen Aktivitäten und die Festlegung verschiedener Modellparameter. Zur Festlegung der Reihenfolge der Modellschritte schreiben Arentze und Timmermans:

... we note that the specific sequence in which scheduling decisions are made include arbitrary elements. In particular, one may argue that, in contrast to the proposed model, location choice is a higher-level decision than transport-

mode choice, at least for a subset of activity types. However, we emphasize that the sequence may be less influential on outcomes than it may seem [2, S. 96].

Ein weiteres Problem ergibt sich daraus, daß Tagebücher beobachtetes Verhalten dokumentieren, aber nur bedingt Rückschlüsse auf die Bedingungen für die Planung zulassen oder auf kurzfristige Veränderungen.

In a strict sense, our data set does not provide information at the activity-programme or schedule level. The diaries represent the activities that individuals actually conducted that day. Not necessarily all reported activities were planned and not necessarily all planned activities were implemented. Yet, in order to be able to estimate our model, we conveniently assume that the observed patterns correspond to activity schedules (all activities were planned and all planned activities were implemented) [2, S. 252].

## AVENA

Mit dem agentenbasierten Konzept von AVENA werden zwei Ziele verfolgt. Zum einen soll AVENA dazu beitragen, Mobilitätsverhalten erklären zu können, zum andern soll ein Untersuchungswerkzeug entstehen, das es erlaubt, durch die Simulation von Szenarien die Auswirkungen von Steuerungsmaßnahmen oder veränderten Randbedingungen zu untersuchen. Letzteres wird umso besser gelingen, je besser das Mobilitätsverhalten verstanden ist. Für die Abbildung der Verkehrsnachfrage in einem typischen Untersuchungsgebiet müssen aber mehrere hunderttausend Agenten simuliert werden. Da das Zustandekommen eines Tagesplanes als ein komplexer Prozess betrachtet wird, ist die Simulation aufwendig. Um die Rechenzeiten zu begrenzen, erscheint es notwendig, bei den tieferliegenden Gründen für das Zustandekommen von Verkehrsnachfrage Einschränkungen zu machen. An den bestehenden Verkehrsnachfragemodellen wird kritisiert, daß sie Verhalten in erster Linie beschreiben und beobachten anstatt es zu erklären: „Damit ist aber der Bezug zu den Rahmenbedingungen weder hinterfragt noch abgebildet, und somit ist unklar, unter welchen Rahmenbedingungen diese Beobachtungen weiterhin gültig sind [10].“

Im Konzept von AVENA leitet sich das Handeln von Bedürfnissen ab. Immer dann, wenn ein Mensch feststellt, daß eines seiner Bedürfnisse nicht erfüllt ist, wird er nach einer Handlungsweise suchen, von der er annimmt, daß sie sein Bedürfnis befriedigt. Eine solche Handlungsweise wird nach Dörner und Schaub [20] *Motiv* genannt. Es setzt

das Handeln in Gang, ist auf ein Ziel ausgerichtet, und kann aufrechterhalten werden bis das Ziel erreicht ist. Der Nutzen einer Aktivität ergibt sich aus den Bedürfnissen, die eine Aktivität befriedigen kann. In der Nachbildung der Zeitverwendung von Personen entscheidet die Priorität von Aktivitäten darüber, wann eine Aktivität in einen Plan aufgenommen wird, und oftmals werden auch andere verkehrsrelevante Entscheidungen von der Priorität abhängig gemacht. Über die Einführung des Nutzens, der wiederum auf Bedürfnisse zurückgeht, sind jetzt Rückschlüsse auf die Priorität möglich. Diese Sichtweise ist auch bei Modifikationen innerhalb der Planung hilfreich. Wenn Aktivitäten durch unvorhergesehene Ereignisse oder konkurrierende Aktivitäten verdrängt werden, hilft der Bezug zu den Bedürfnissen zu beurteilen, ob der Wegfall einer Aktivität oder eine Verschiebung sinnvoll ist. Es ist denkbar, daß die Ersatzaktivität, ebenfalls einen Teil der Bedürfnisse befriedigt oder daß deren Bedürfnisse Vorrang haben.

Außerdem wird betont, daß Menschen sich das Wissen über ihre Umgebung in einem Lernprozeß aneignen [11]. Das spielt vor allem bei der Fähigkeit zur Orientierung im Raum eine Rolle. In vielen Modellen wird bei der Wahl von Zielen und Routen davon ausgegangen, daß die Personen die räumlichen Beziehungen verschiedener Orte kennen. Wenn Menschen eine Umgebung kennenlernen, entsteht eine sogenannte kognitive Karte, die gegenüber einer objektiven Karte besondere Merkmale aufweist. Sie hat eine innere Struktur bestehend aus Kanten, Distrikten, Pfaden, Knoten und Landmarken. Die kognitive Karte ist verzerrt, unvollständig, und sie kann Elemente enthalten, die in der realen Umgebung gar nicht vorkommen. Da Verkehrsmodelle meistens objektive Karten zugrundelegen, sind sie in diesem Punkt unrealistisch.

Die Einführung von Bedürfnissen als Antrieb für das Handeln und damit auch für das Verkehrsverhalten eröffnet die Möglichkeit, Verkehrsverhalten in gewisser Weise zu erklären, und macht die Modellierung flexibler und konsistenter. Das Problem, die Prioritäten von Aktivitäten gegeneinander abzuwägen, wird dadurch zunächst nur verlagert. Zusätzlich muß bestimmt werden, welche Aktivitäten welche Bedürfnisse befriedigen. Eine solche Zuordnung wird in keiner der Richtungen eindeutig sein. Ein Essen mit Freunden stillt den Hunger, kann aber in erster Linie durch soziale Bedürfnisse motiviert sein und wird vielleicht zudem noch als Unterhaltung mit Freizeitwert empfunden. Wie die Autorin selbst darlegt, wird in der Psychologie kontrovers diskutiert, wie man zu einer systematischen Einteilung von Bedürfnissen kommen kann, und Bedürfnisse haben in verschiedenen Gesellschaften und zu verschiedenen Zeiten einen unterschiedlichen Stellenwert. Bei der Umsetzung des Modells mußte darauf verzichtet werden, Planungsentscheidungen auf die Bedürfnisse der handelnden Personen zurückzuführen, weil keine



geeigneten Daten für die Verknüpfung von Bedürfnissen zu Aktivitäten bekannt waren.

Die Diskussion der Art und Weise, wie Menschen Informationen aufnehmen und verarbeiten und wie sich daraus die Sichtweise der Umgebung verändert, liefert wichtige Beiträge für die Modellierung der Bedingungen, unter denen Entscheidungen gefällt werden, und der Bereitschaft von Menschen, ihr Verhalten zu ändern. Die Konzeption von AVENA läßt noch offen, wie der Lernprozess in ein Verkehrsverhaltensmodell eingebunden werden soll. Wenn über eine realitätsnahe Modellierung des Lernens der Inhalt der kognitiven Karte nachgebildet werden soll, entsteht die Schwierigkeit, den Ausgangspunkt des Prozesses zu bestimmen und die vielfältigen Einflüsse zu erfassen.



# Kapitel 2

## Erzeugung von Tagesplänen

### 2.1 Modellstruktur

In Kapitel 1 wurden verschiedene Betrachtungsweisen der Zeitverwendung von Menschen vorgestellt. Sie reichen von der Vorstellung, daß Menschen sich aus allen Möglichkeiten die beste wählen, über die Auffassung, daß es sich hierbei um eine schrittweise Problembewältigung handelt, bis zu der Frage, wie Aktivitäten auf die Bedürfnisse der Menschen zurückgeführt werden können. Jede diese Überlegungen ist mit einer mehr oder weniger präzise ausformulierten Theorie über menschliches Handeln verknüpft, die beschreibt, welche Eigenschaften der Menschen und der Umwelt beim Zustandekommen eines Tagesablaufs wichtig sind. Bei der Umsetzung der Modelle in die Praxis müssen die Aussagen der Theorie operationalisiert werden. Meistens geht das über den Weg von Parametern, die den Einfluß verschiedener Umweltbedingungen quantifizieren. In einem weiteren Schritt ist anzugeben, wie die Werte der Parameter bestimmt werden können und welchen Geltungsbereich sie haben. Je nach der zugrundeliegenden Theorie erfordert das intensive Erhebungen, die den Einsatz für große Untersuchungsgebiete erschweren oder verteuern.

Das hier vorgestellte Modell orientiert sich unmittelbar an beobachtetem Verhalten, das zum Beispiel in Form von Tagebucheintragungen für die Auswertung zugänglich ist. Es wird davon ausgegangen, daß Menschen mit dem Problem konfrontiert sind, die Aktivitäten ihres Tages so zu organisieren, daß sie den von außen gestellten Anforderungen und den eigenen Bedürfnissen gerecht werden. Jeder realisierte Tagesablauf ist eine Lösung dieses Problems für die jeweiligen Begleitumstände, in der sich die betrachtete Person befand. Die beobachteten Tagesabläufe waren durchführbar und erschienen der

Person auch in Bezug auf die Kombination und die Abfolge der Aktivitäten als sinnvoll. Tagesabläufe zeigen eine große Vielfalt. Das gilt für verschiedene Tage ein und derselben Person und in noch stärkerem Maße für die Tagesabläufe verschiedener Personen. Wie auch immer die Zeitverwendung gestaltet wird, sie muß doch gewissen Randbedingungen genügen, so daß sich über eine sorgfältige Beachtung der Randbedingungen bei der Modellierung schon entscheidende Informationen über mögliches Verkehrsverhalten gewinnen lassen. Folgende Randbedingungen sind von Bedeutung:

1. **Raum-zeitliche Einschränkungen:** Man kann sich zu einem Zeitpunkt nur an einem Ort aufhalten und sich nur mit einer begrenzten Geschwindigkeit fortbewegen, wobei die Geschwindigkeit vom Transportmittel und den Verkehrsbedingungen abhängt. Ein Fahrzeug kann zu einer Zeit nur einmal im Verkehrsnetz unterwegs sein. Die Wege von Personen haben eine Reihenfolge, können sich nicht zeitlich überschneiden und sind nur dann sinnvoll, wenn der Person zwischen den Wegen genügend Zeit für die Ausübung der Tätigkeit bleibt, um derentwillen ein Weg unternommen wird.
2. **Organisatorische Randbedingungen:** Je nach Aktivität ist nicht nur ein Zeitbudget vorzusehen, sondern es müssen auch Zeitrahmen oder Zeitpunkte beachtet werden, weil diese Aktivitäten mit anderen Personen abgestimmt oder an die Vorgaben von Anbietern oder Institutionen angepaßt werden müssen. So sind im allgemeinen Arbeitszeiten, Öffnungszeiten, Sprechstunden und Anfangszeiten von Veranstaltungen vorgegeben.
3. **Verkehrsmittel:** Einer Person stehen nur bestimmte Verkehrsmittel zur Verfügung. Die Wahl eines individuellen Verkehrsmittels für einen Weg kann dazu zwingen, das Verkehrsmittel auch wieder für den Rückweg oder weitere Etappen zu benutzen. Umgekehrt können Wege einer Tour nur dann mit einem individuellen Verkehrsmittel zurückgelegt werden, wenn dieses Verkehrsmittel auch schon für den ersten Weg genutzt wurde.
4. **Anforderungen des Aktivitätenrepertoires:** Menschen haben ein bestimmtes Aktivitätenrepertoire, das durch ihre Bedürfnisse und Anforderungen von außen bestimmt ist. Das führt dazu, daß für verschiedene Aktivitäten mehr oder weniger Zeit im Tagesablauf reserviert ist. Die Abfolge von Aktivitäten folgt inhaltlichen Regeln. So müssen zum Beispiel Schlafenszeiten über die Tage der Woche verteilt werden und lassen sich nicht beliebig auch bei gleichem Gesamtbudget nur auf einen oder zwei Tage konzentrieren.

5. **Einhaltung von Ansprüchen:** Menschen haben bestimmte Erwartungen und Ansprüche, die einen großen Einfluß darauf haben, ob eine Angebot oder eine Alternative akzeptiert wird. Es wird davon ausgegangen, daß Menschen sich bemühen, ihren Tagesablauf so zu gestalten, daß die für Wege aufgewendeten Kosten, Mühe und Zeit jeweils ein gewisses Niveau nicht überschreiten.

Die Randbedingungen 1 bis 3 entsprechen in einer etwas anderen Gliederung den Randbedingungen Hägerstrands [34]. Die Punkte 4 und 5 werden üblicherweise nicht als Randbedingungen aufgefaßt. Tatsächlich bestimmen Menschen selbst über ihr Aktivitätenrepertoire und legen selbst die Maßstäbe fest, nach denen sie Alternativen bewerten. Diese Festlegungen ändern sich aber nicht von Tag zu Tag und können daher für die Prognose von alltäglichem Verkehr als gegeben angenommen werden. Von den anderen Randbedingungen unterscheidet sie aber immer noch, daß sie in besonderem Maße an die Eigenschaften der Person gebunden sind. Um sie daher im Modell angemessen berücksichtigen zu können, ist zu untersuchen, welche Eigenschaften der Personen hier eine entscheidende Rolle spielen.

Der Tag als die prägnanteste Periode im Verkehrsgeschehen ist der Untersuchungszeitraum des Modells. Er zeigt allerdings durch morgendliche und nachmittägliche Verkehrsspitzen auch eine innere Struktur. Daneben spielen die Woche, Ferienzeiten und die Jahreszeit eine Rolle. Es gibt aktivitätsbasierte Ansätze, wo die Woche als sinnvoller Zeitraum für die Modellierung angesehen wird [18, 77, 52]. Dies wird damit begründet, daß sich die Zeitplanung der Menschen stark an diesem Rhythmus orientiert. In dieser Arbeit steht jedoch kein Modell für die Zeitplanung im Mittelpunkt. Die Zeitverwendung wird als eine empirische Größe betrachtet, die allerdings auf besondere Art und Weise zu analysieren ist, um sie für das Modell verwenden zu können. An die Stelle der empirischen Daten kann auch ein anderes Modell treten, das in der Art vergleichbare Eingangsgrößen liefert. Die Frage, inwiefern sich Ereignisse oder durchgeführte Aktivitäten am Montag auf die Zeitverwendung und damit auf das Verkehrsgeschehen am Mittwoch auswirken, spielt hier keine Rolle. Freilich kann bei einer entsprechend großen Datenbasis oder mit einem oben erwähnten vorgeschalteten Modell die Besonderheit eines Montags gegenüber einem Mittwoch betrachtet werden. Diese ist dann aber auf die Eingangsdaten und nicht auf einen Mechanismus in dem hier vorgestellten Modell zurückzuführen.

Das Aktivitätenrepertoire wird aus Tagebüchern der Zeitbudgeterhebung des Statistischen Bundesamtes abgeleitet, indem in der Menge der Tagebücher charakteristische Klassen gebildet werden. In einem zweiten Schritt wird festgestellt, welche Eigenschaf-

ten der Personen einen signifikanten Einfluß ausüben auf die Verteilung der Tagebücher auf die Klassen. In der Simulation werden die Tagebücher zu Schemata erweitert, und den Personen des Untersuchungsgebietes werden die Schemata entsprechend der Verteilung in den Tagebuchklassen zugeordnet. Dem liegt der Gedanke zugrunde, daß die Werktage der Menschen nicht alle nach einem immer gleichen Muster ablaufen. An verschiedenen Tagen werden durchaus verschiedene Aufgaben bewältigt. Wenn aber diese Aufgaben anfallen, so wird angenommen, daß sie jeweils in ähnlicher Weise in den Tagesablauf aufgenommen werden. Die Schemata repräsentieren Lösungen für die Organisation des Alltags für eine bestimmte Personengruppe.<sup>1</sup> Es wird davon ausgegangen, daß die Strategien, die zu den beobachteten Tagesabläufen führen, in ähnlichen Situationen ähnliche Tagesabläufe erwarten lassen. Entscheidungen von Menschen für Verpflichtungen und für Aktivitäten des Repertoires und für Routinen werden nicht täglich neu gefällt. Vielmehr werden erfolgreiche Strategien über einen längeren Zeitraum beibehalten und nur verändert oder verworfen, wenn sie dem Individuum nicht mehr angemessen erscheinen [45]. Zu den Anspruchsniveaus liegen keine direkten empirischen Untersuchungen für die hier bearbeitete Fragestellung vor. Es ist aber zum Beispiel plausibel, daß der Aufwand für Wege in einem angemessenen Verhältnis zu der Bedeutung der Aktivität stehen muß, die Auslöser für den Weg war. Einen weiteren Hinweis gibt das Reisezeitbudget. Es ist zwar für verschiedene Bevölkerungsgruppen durchaus unterschiedlich, zeigt aber über die Zeit eine bemerkenswerte Konstanz [28]. Offenbar gibt es eine Grenze für den zeitlichen Aufwand für Wege, die nur ungern überschritten wird.

Abbildung 2.1 zeigt die einzelnen Schritte der Simulation, die hier in der Übersicht beschrieben werden soll. Einzelheiten werden in den folgenden Abschnitten ausführlicher erläutert. Ausgangspunkt ist eine Person des Untersuchungsgebietes, deren Wohnort bekannt ist, und die aufgrund ihrer soziodemographischen Merkmale einer bestimmten Kategorie von Personen zugeordnet werden kann. Die Person ist hier Teil einer sogenannten synthetischen Bevölkerung, deren Erzeugung den Zweck verfolgt, die notwendige Kombination von Merkmalsausprägungen für die Personen des Modells zusammenzustellen. Die Personenkategorie wird verwendet, um der Person ein Schema eines Tagesplanes zuzuordnen. Die Auswahl beruht auf einer Klassifizierung von Tagesplänen und der Häufigkeit der Tagebücher einer Klasse für die verschiedenen Personenkategorien. Ein Schema ist eine Abfolge von Aktivitäten, die hier *Episoden* genannt werden, um sie

---

<sup>1</sup>Schmiedel [66] hält den Begriff Gruppe für problematisch, weil die Personen hier nicht miteinander in Beziehung stehen und zum Beispiel nicht als Gruppe handeln. Alternativ wird im folgenden auch *Personenkategorie* verwendet.

von Aktivitätentypen zu unterscheiden. Für jede Episode wird ermittelt, wie stark Dauer und Anfangszeitpunkt innerhalb der Tagebuchgruppe variieren. Aus jedem Tagebuch der Erhebung wird ein Schema abgeleitet, sofern die Abfolge von Aufenthalten und Wegen konsistent ist oder wenn durch Einfügen von Wegen nach einfachen Regeln eine konsi-

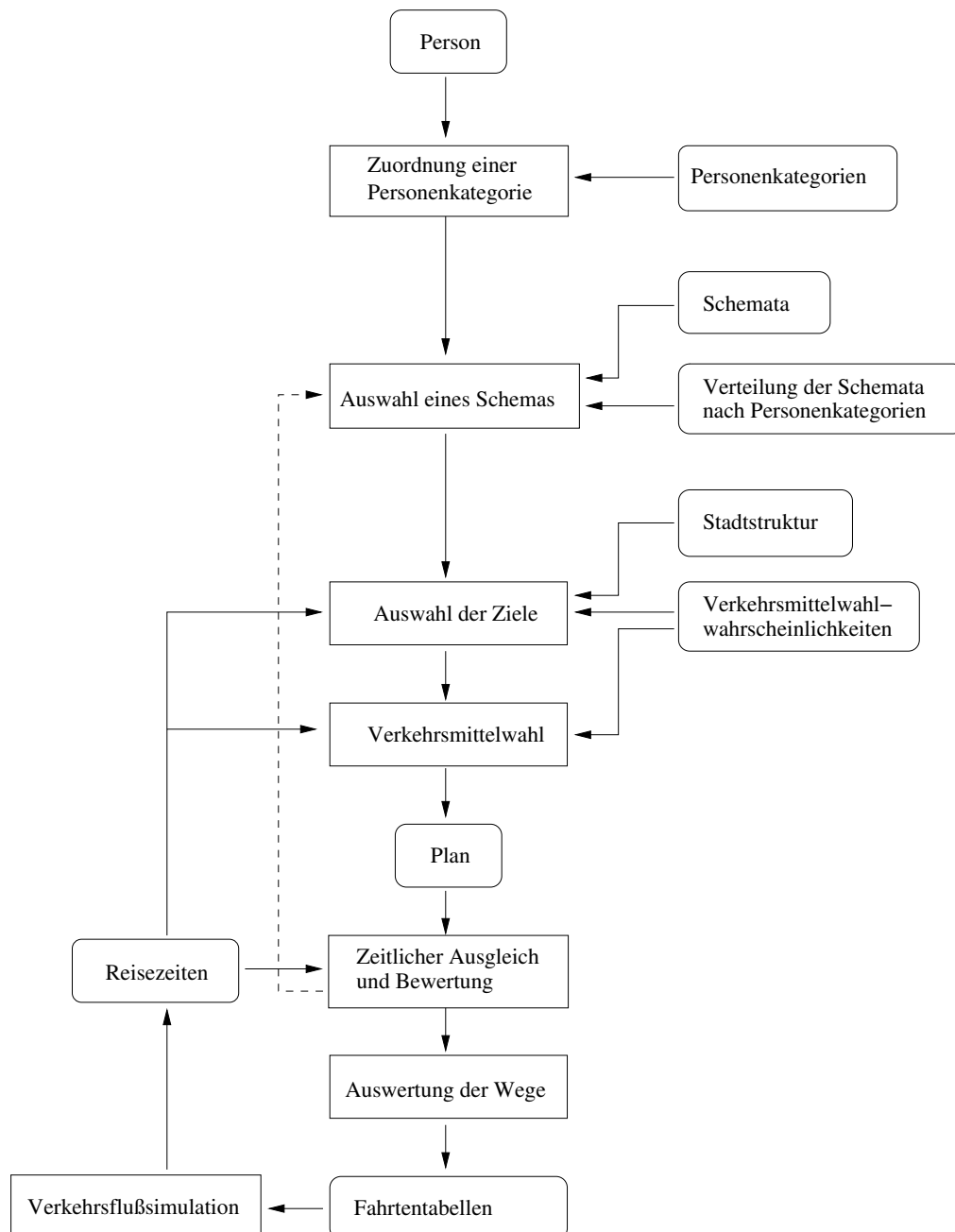


Abbildung 2.1: Ablaufschema der Simulation des Verkehrsaufkommens

stente Abfolge von Episoden erreicht werden kann.

Für jede Episode außer Haus wird ein Ziel gewählt. Da der Wohnort der Person bekannt ist und die Lage potentieller Ziele in der näheren oder fernerer Umgebung, können Ziele unter Berücksichtigung der Verkehrsmittel, die der Person zur Verfügung stehen, so ausgewählt werden, daß der Erreichbarkeit von Zielen und den räumlichen Gegebenheiten Rechnung getragen wird. Wenn die Ziele feststehen, werden für alle Wege des Tages die Verkehrsmittel bestimmt. Die Auswahlwahrscheinlichkeiten gehen auf eine CHAID-Analyse (*Chi-Square Automatic Interaction Detection*) [44] zurück und berücksichtigen die Entfernung, den Wegezweck, Eigenschaften der Person und die Ausstattung des Haushalts. Damit sind alle Aspekte der Wege bekannt und in einem sogenannten Plan festgehalten. Im allgemeinen weichen die Reisezeiten in der gegebenen Situation von den ursprünglichen Reisezeiten des Schemas ab. Die bekannten Variationen der Dauer und des Anfangszeitpunktes der Episoden werden nun als Beweglichkeit interpretiert, und die Dauer und die Anfangszeitpunkte werden je nach Beweglichkeit an die neuen Reisezeiten angepaßt. Das führt zu einer Verzerrung des Schemas, deren Wert als Ergebnis der Anpassung erhalten wird. Wenn die Verzerrung einen bestimmten Wert nicht überschreitet, wird der Plan akzeptiert, andernfalls wird der Prozeß der Auswahl der Ziele und der Verkehrsmittel mit einem anderen Schema von neuem durchlaufen. Die Zahl der abgelehnten Schemata und ihre Verzerrung ist ein Indiz für den Spielraum von Personen, ihren Tagesablauf zu gestalten und wird für verschiedene Quartiere getrennt ausgewertet. Abbildung 2.2 illustriert das Verfahren des Ausgleichs von zeitlichen Verschiebungen, die dadurch hervorgerufen werden, daß die Reisezeiten des ursprünglichen Musters sich von den Reisezeiten unterscheiden, die im simulierten Tagesplan bei veränderten räumlichen Gegebenheiten auftreten.

Wenn ein Plan als durchführbar erscheint, werden die Wege, die im Pkw oder Motorrad zurückgelegt werden, in eine Fahrtentabelle eingetragen. Diese ist die Grundlage einer Verkehrsflußsimulation, für die auf Arbeiten des Zentrums für angewandte Informatik an der Universität zu Köln (ZAIK) zurückgegriffen wird [31, 23]. Ergebnis der Verkehrsflußsimulation sind Reisezeiten für diese Verkehrsmittel. Je nachdem wie stark diese Reisezeiten von den ursprünglich angenommenen Reisezeiten abweichen, wird die Planung wiederholt, so lange bis sich ein konsistenter Zustand ergibt, so daß die geplanten Tagesabläufe vor dem Hintergrund der Reisezeiten, die sie erzeugen, als durchführbar erscheinen.



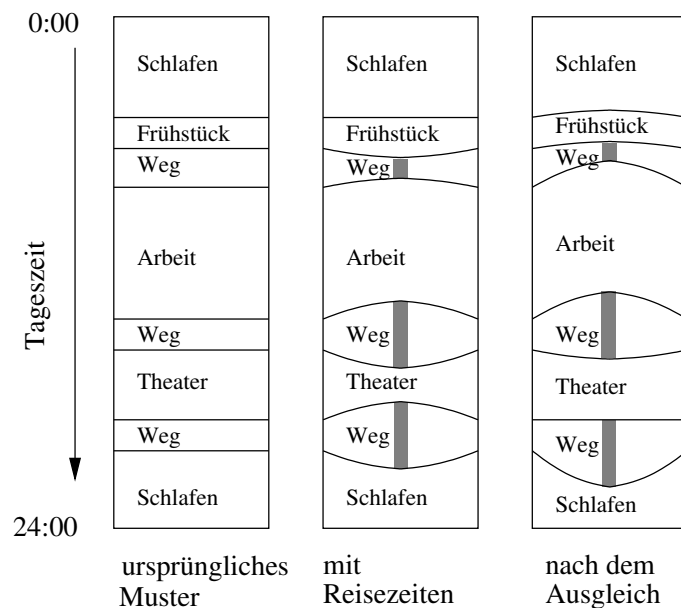


Abbildung 2.2: Anpassung eines Schemas bei Abweichungen in den Reisezeiten

## 2.2 Aufbau einer synthetischen Bevölkerung

Die Tatsache, daß eine mikroskopische Simulation das Verkehrsverhalten von Einzelpersonen im Rechner abbildet, eröffnet prinzipiell die Möglichkeit, nicht nur zu berücksichtigen, wie sich bestimmte Merkmale wie zum Beispiel Stellung im Beruf, Alter und Geschlecht auf Zeitnutzung und Verkehrsnachfrage auswirken, sondern alle sinnvollen Kombinationen der Ausprägungen dieser Merkmale zu unterscheiden. Das setzt voraus, daß es eine entsprechende Beschreibung der Eigenschaften auf der Ebene von Einzelpersonen für den betrachteten Raum gibt. Diese wäre nur durch eine vollständige Befragung zu erreichen, würde zu erheblichen Kosten und möglicherweise auch zu Akzeptanzproblemen führen. Daher beruht die Simulation auf einer sogenannten synthetischen Bevölkerung, bei der zwar die geforderte Kombination der Merkmale für jede Person bekannt ist, die aber nur in den Randverteilungen mit der tatsächlichen Bevölkerung übereinstimmt und in Bezug auf die Kombination der Merkmale in einem bestimmten Sinne möglichst gut an die tatsächlichen Verhältnisse angepaßt ist. Anhand der soziodemographischen Daten wird geschätzt, welche Aktivitäten eine Person ausübt. Die Ergebnisse von Untersuchungen, inwiefern soziodemographische Variablen hierfür ausreichen, und wie unterschiedliches Verhalten bei soziodemographisch ununterscheidbaren Personen anhand von Erfahrung, Einstellungen und Werthaltungen beschrieben werden kann

[4, 40], lassen sich prinzipiell in das Modell integrieren. Dazu ist allerdings das Problem zu lösen, wie solche Größen für die Personen der synthetischen Bevölkerung geschätzt werden können.

Das Verfahren des *iterative proportional fitting* [17, 5] läßt sich zur Erzeugung einer synthetischen Bevölkerung nutzen, wenn für die einzelnen interessierenden Variablen die Häufigkeitsverteilungen für das Untersuchungsgebiet bekannt sind und wenn es eine hinreichend große Stichprobe gibt, in der die Ausprägungen der Variablen gemeinsam vorliegen. Im allgemeinen unterscheiden sich die Randverteilungen der Stichprobe von den Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Variablen. Für zwei Variablen läßt sich das Problem anhand einer Matrix veranschaulichen:

$m_{11}$	$m_{12}$	$\dots$	$m_{1j}$	$\dots$	$n_{1.}$
$m_{21}$	$m_{22}$	$\dots$	$m_{2j}$	$\dots$	$n_{2.}$
$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$		$\vdots$
$m_{i1}$	$m_{i2}$	$\dots$	$m_{ij}$	$\dots$	$n_{i.}$
$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$		$\vdots$
$n_{.1}$	$n_{.2}$	$\dots$	$n_{.j}$	$\dots$	$n$

Die  $m_{ij}$  sind die Häufigkeiten in der Stichprobe, die  $n_{i.}$  ist die Randverteilung der ersten, und die  $n_{.j}$  diejenige der zweiten Variablen. In dieser Notation wird über die Variable, deren Position mit einem Punkt markiert ist, die Summe gebildet. Es sind nun Werte  $m'_{ij}$  so zu bestimmen, daß die Randverteilungen mit den vorgegebenen Verteilungen übereinstimmen. Dabei soll die Summe der Quadrate der Differenzen zu den  $m_{ij}$  möglichst klein sein. Man erreicht das über eine iterative Anpassung der Randverteilungen für die einzelnen Variablen. Im ersten Schritt werden die  $m_{ij}$  an die Spaltensummen angepaßt:

$$m_{ij}^{(1)} = m_{ij} \frac{n_{.j}}{m_{.j}}$$

und im nächsten Schritt an die Zeilensummen:

$$m_{ij}^{(2)} = m_{ij}^{(1)} \frac{n_{i.}}{m_{i.}^{(1)}}.$$

Diese Anpassungen werden abwechselnd wiederholt. Der Prozeß konvergiert in wenigen Schritten, wenn nicht zuviele Zellen innerhalb der Matrix unbesetzt sind. Das Verfahren läßt sich auf eine größere Zahl von Variablen ausdehnen. Je nach der Zahl der Ausprägung einer jeden Variable, werden einzelne Kombinationen sehr selten werden. Dann muß die Stichprobe für vertrauenswürdige Startwerte entsprechend groß sein, und es steigt der Aufwand für die Erhebung.

## 2.3 Auswertung von Tagebuchdaten

Am Anfang der Modellkette steht die Zeitverwendung. Hier werden die Ergebnisse der Zeitbudgeterhebung des Statistischen Bundesamtes von 1991/1992 genutzt [21, 38]. Die Zeitverwendung wurde hier in Form von Zeittagebüchern erfaßt. Die Befragten haben für zwei aufeinanderfolgende Tage für Zeitintervalle von jeweils fünf Minuten dokumentiert, welcher Tätigkeit sie nachgegangen sind. Die Protokolle wurden im Nachhinein einer von 231 Aktivitäten zugeordnet und kodiert. Damit liegen die Tagebücher in Form von Sequenzen vor, die sich mit Hilfe von *Sequence Alignment*-Methoden vergleichen lassen. Die erhaltenen Distanztabelle werden für eine Clusteranalyse benutzt, um typische Tagesverläufe voneinander zu unterscheiden. Mit Bezug auf die erhaltene Klassifizierung werden nun die Eigenschaften der Personen untersucht und die wichtigsten soziodemographischen Merkmale identifiziert. Die Personenkategorien werden verwendet, um jeder Person der synthetischen Bevölkerung ein Zeitverwendungsschema zuzuordnen. Dabei wird nicht unterstellt, daß für eine Person einer bestimmten Kategorie nur *ein* Zeitverwendungsschema maßgebend ist, vielmehr verfügt jede Personenkategorie über eine charakteristische Verteilung der Tagebuchklassen.

Wenn Menschen mit anderen Menschen in Haushalten zusammenleben, dann werden Aktivitäten mehr oder minder intensiv mit den Haushaltsmitgliedern abgestimmt. Aus der Haushaltsführung und der Rollenverteilung im Haushalt ergeben sich die Aufgaben, die für den Haushalt und für seine Mitglieder bewältigt werden müssen [66]. Die Aufgaben werden unter den Haushaltsmitgliedern aufgeteilt. Ein weiterer Grund für die Ausdehnung der Modellierung auf Haushalte ist der Umstand, daß die Ausstattung des Haushalts von den Mitgliedern gemeinschaftlich genutzt wird. Es bestehen zum Beispiel meistens Vereinbarungen, von wem vorhandene Fahrzeuge genutzt werden können, oder es werden kurzfristige Absprachen hierüber getroffen. Haushalte können auf unterschiedliche Art und Weise zusammengesetzt sein, es gibt viele Möglichkeiten, die Aufteilung von Aufgaben und Ressourcen zu organisieren. Je größer der Haushalt ist, desto größer ist die Zahl der Möglichkeiten, wie Aufgaben und Ressourcen tatsächlich unter den Mitgliedern aufgeteilt werden, und desto komplexer wird die Beschreibung der Verflechtung der einzelnen Aktivitäten [61].

Die synthetische Bevölkerung für das vorliegende Modell ist in Haushalten organisiert, um einige soziodemographische Variablen auf den Haushalt beziehen zu können, wie Haushaltsgröße, die Zahl der Kinder im Haushalt, das Haushaltseinkommen und die Zahl der Fahrzeuge im Haushalt. Über die Verwendung von Autos wird Buch geführt, so

daß für eine Tour nur dann ein Auto genutzt werden kann, wenn es für die Zeit der Tour nicht schon von einem anderen Haushaltsmitglied genutzt wird (siehe Abschnitt 2.6). Die Aktivitätsmuster werden nicht innerhalb des Haushalts abgestimmt. Die Haushaltsstruktur geht hier nur indirekt über die Typenbildung der soziodemographischen Gruppen ein.

### 2.3.1 Datengrundlage

Die Zeitbudgeterhebung des Statistischen Bundesamtes wurde in den Jahren 1991 und 1992 erhoben und 1999 als anonymisiertes *Scientific Use File* für Forschungszwecke zugänglich gemacht. Die Konzeption der Erhebung ist in [21] und im Handbuch zum Scientific Use File [38] beschrieben:

Die Zeitbudgeterhebung (ZBE) des Statistischen Bundesamtes ist wie der Mikrozensus, das Europäische Haushaltspanel und die Einkommens- und Verbrauchsstichprobe Teil des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projektes, wissenschaftlichen Nutzerinnen und Nutzern Zugang zu amtlichen Mikrodaten zu ermöglichen. Die Zeitbudgeterhebung wurde vom Statistischen Bundesamt in Zusammenarbeit mit den Statistischen Ämtern der Länder bei rund 7200 Haushalten durchgeführt. Die Befragung erfolgte via Quotenauswahl zu vier Erhebungszeiträumen vom Herbst 1991 bis zum Sommer 1992 im früheren Bundesgebiet und in den neuen Ländern. Erfaßt wurde die Zeitverwendung aller Haushaltsmitglieder ab dem 12. Lebensjahr (Haushalte mit deutscher Bezugsperson). Diese sollten an zwei aufeinanderfolgenden Tagen ihren Tagesablauf im 5-Minuten-Rhythmus in einem Tagebuch mit eigenen Worten aufschreiben. Neben den im Vordergrund stehenden Hauptaktivitäten wurden auch Angaben zu gleichzeitigen Aktivitäten erfaßt, zu den beteiligten bzw. anwesenden Personen, dem Ort der Hauptaktivität und für wen diese ausgeübt wird. Die in den Tagebüchern beschriebenen Haupt- und gleichzeitigen Aktivitäten wurden mit Hilfe einer aus über 200 Tätigkeiten bestehenden Aktivitätenliste verschlüsselt, die folgende Bereiche [...]umfaßt:

- Hauswirtschaftliche Tätigkeiten
- Handwerkliche Tätigkeiten
- Erwerbstätigkeit/Arbeitssuche

- Ehrenamt/Soziale Dienste
- Qualifikation/Bildung
- Physiologische Regeneration
- Geselligkeit/Kontakte
- Mediennutzung/Freizeitaktivitäten
- Kinderbetreuung
- Pflege

Rüst-, Wegezeiten (Fahrdienste) und die benutzten Verkehrsmittel wurden ebenfalls erfaßt.

Die soziodemographischen Variablen sind in Einführungs- und Schlußinterviews für alle Haushaltsmitglieder erhoben worden. Gleiches gilt für Variablen zur Pflege und Betreuung. Das heißt, der Haushalt wird in seiner Gesamtstruktur abgebildet — einschließlich der Angaben zu Kindern unter 12 Jahren, die noch zu jung waren, um ein eigenes Tagebuch zu führen. Variablen zur Infrastruktur und zu Netzwerken sind ebenso vorhanden. Die — aus Gründen des Datenschutzes faktisch anonymisierten — Mikrodaten der Zeitbudgeterhebung stehen seit April 1999 als Scientific Use File Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern für eigene Analysen zur Verfügung.

*Die Zeitbudgeterhebung als Scientific Use File* [38, S. I 2]

Die Quotierungsmerkmale waren für Haushalte im früheren Bundesgebiet: Gemeindegrößenklasse, Stellung der Bezugsperson im Beruf und Haushaltstyp. Für das Gebiet der östlichen Bundesländer waren die Quotierungsmerkmale: Gemeindegrößenklasse, Stellung der Bezugsperson im Beruf und Haushaltsgröße. Die Ausprägungen der Merkmale sind im Handbuch, Teil II, Seite 12 aufgeführt. Die Kodierung der Aktivitäten fand nachträglich statt. Den Befragten lag kein Aktivitätenkatalog vor.

Der Differenzierungsgrad der Aktivitäten ergab sich aus den folgenden Kriterien:

1. Den Untersuchungszielen, d.h. der Abbildung unbezahlter Arbeit sowie der Beschreibung von Zeitverwendungsstrukturen unter dem Gesichtspunkt frauen- und familienpolitischer Fragestellungen.
2. Dem vorgegebenen Fünf-Minuten-Takt, der die Mindestdauer von zu erfassenden eigenständigen Aktivitäten vorgibt.

Die Untersuchungsschwerpunkte führten dazu, daß Aktivitätsbereiche wie hauswirtschaftliche und handwerkliche Tätigkeiten, Pflege und Betreuungstätigkeiten detailliert erfaßt, hingegen Aktivitäten wie z.B. Sport oder einzelne Arbeitsgänge [oder Wege] während der Erwerbstätigkeit nicht weiter differenziert wurden.

*Die Zeitbudgeterhebung als Scientific Use File [38, S. II 7]*

Die einzelnen Tagebücher sind in einer ganz bestimmten Umgebung unter bestimmten Vorgaben entstanden, die nur zum Teil bekannt sind. Das Interesse besteht darin, Strukturen in der Zeitverwendung und Zusammenhänge zwischen soziodemographischen Merkmalen und der Teilnahme an Aktivitäten auszumachen, die sich allgemeiner formulieren lassen und die auf andere Fälle übertragbar sind. Dazu müssen die Einzeldaten verglichen werden. Die Zusammenfassung zu Klassen erlaubt es, eine Übersicht über die Daten zu gewinnen und zu untersuchen, welche Merkmale für eine Klassenbildung besonders von Bedeutung sind.

### 2.3.2 Vergleich von Tagebüchern

Der erste Schritt in der Beschreibung einer Datenmenge ist die Festlegung eines Vergleichsmaßstabes. Wenn sich die jeweilige Information in einem Skalar oder Vektor fassen läßt, kann man auf die üblichen mathematischen Relationen zwischen diesen Größen zurückgreifen. Im Falle der vorliegenden Tagebuchdaten ist ein solcher Vergleichsmaßstab nicht von vornherein gegeben. Eine Möglichkeit besteht darin, sie als eine Sequenz von Aktivitäteneinträgen aufzufassen und mit Methoden der Sequenzanalyse zu vergleichen. Dabei muß zunächst die Frage beantwortet werden, welche Aktivitäten unterschieden werden sollen. Soll zum Beispiel *Hausarbeit* eine Kategorie sein oder differenziert man hier nach *Spülen*, *Wäsche Waschen*, *Kehren*, *Fenster Putzen*? Wenn in einem maschinellen Verfahren zum Vergleich nur geprüft wird, ob Aktivitäten gleich oder verschieden sind, wird nicht mehr erkennbar, daß *Fenster Putzen* immer noch eine Art von *Hausarbeit* ist. Man kann sich hier behelfen, indem man für die Aktivitäten Distanztafeln festlegt, die angeben, wie unterschiedlich jeweils zwei Aktivitäten sind. In diesem Fall müssen dann sinnvolle Werte für die Elemente dieser Distanzmatrix gefunden oder festgelegt werden.

Die vom Statistischen Bundesamt vorgegebene Einteilung der Aktivitäten orientiert sich an der oben beschriebenen Zielsetzung, unbezahlte Arbeit und Hilfeleistungen zu quantifizieren. Daher sind hauswirtschaftliche Tätigkeiten sehr fein aufgeschlüsselt, während bei *Erwerbsarbeit* nicht weiter differenziert wird. Mit Rücksicht auf die Fragestel-

Code	Kategorie	Beschreibung
10	Hauswirtschaft	
50	Einkäufe	
80	Wege	
211	Arbeit	Erwerbsarbeit
299	aktive Freizeit/Arbeit zuhause	handwerkliche Tätigkeiten, Erwerbsarbeit zuhause
410	Schule/Studium	
511	Schlafen	
531	Essen zuhause	
700	Freizeit zuhause	
711	Fernsehen	
720	aktive Freizeit außer Haus	ehrenamtliche Tätigkeiten, Ausflüge, Familienfeste
800	Betreuung von Kindern/Alten	

Tabelle 2.1: *Reduzierte Aktivitätenliste für den Vergleich der Tagebücher*

lung der Arbeit wurde der Aktivitätenkatalog für den Vergleich der Tagebücher auf zwölf Kategorien reduziert. Die Zusammenfassung zu größeren Kategorien orientiert sich zum einen am Budget, das die einzelnen ursprünglichen Kategorien hatten, zum anderen an den Orten, wo die Aktivitäten stattfinden. Die Aktivitäten der weiteren Untersuchung sind in Tabelle 2.1 aufgeführt. Die vollständige Tabelle mit der Zuordnung der ursprünglichen Kategorien findet sich im Anhang A.

### Hamming Distanz

Wenn Sequenzen gleicher Länge verglichen werden sollen, ist die einfachste Form eines solchen Vergleichs die Hamming-Distanz [50]. Man ordnet jedem Element der Sequenz *A* das entsprechende Element der Sequenz *B* zu und zählt die Fälle, in denen die Elemente unterschiedlich sind. Dieses Verfahren beansprucht ein Minimum an Rechenzeit, ist aber zu rigide für die hier relevanten Fragestellungen. Zwei Sequenzen, die einander sehr ähnlich sind, aus vielen kurzen Aktivitätenblöcken bestehen, aber um eine kleine Zeitspanne gegeneinander verschoben sind, weisen eine große Hamming-Distanz auf, und im Vergleich zu unserem Empfinden wird der Abstand überschätzt.

### Sequence Alignment

Das Verfahren des Sequence-Alignment ist flexibler. Hier betrachtet man die Operationen, die nötig sind, um die Sequenz  $A$  in  $B$  umzuwandeln. Die erlaubten Operationen sind das Streichen eines Elementes, das Einfügen eines Elementes oder das Ersetzen eines Elementes. Jede dieser Operationen wird mit bestimmten Kosten belegt, und der Abstand der Sequenzen wird als die Summe der Kosten aller Einzeloperationen aufgefaßt, die für die Umformung nötig sind. Dabei ist diejenige Umformung zu wählen, die am wenigsten Kosten verursacht. Wilson diskutiert die Ergebnisse des Verfahrens, wenn es auf Zeitverwendungsdaten angewandt wird. Dabei kommt es darauf an, ob ein Tagesablauf, aufgrund von Zeitintervallen als Sequenz beschrieben wird, oder ob nur die Abfolge der Episoden betrachtet wird [79].

Das Sequence-Alignment läßt sich effizient implementieren in einem sogenannten *dynamic programming* Algorithmus [33]. Statt der Operationen *Streichen* oder *Einfügen eines passenden Elementes* werden jeweils Lücken gelassen, denen kein passendes Element gegenüberstehen muß, und man findet das günstigste Alignment induktiv, indem man die Ergebnisse für kürzere Sequenzen verwendet: Gesucht sei die günstigste Umformung für die Teilsequenzen  $A[1 : i]$  und  $B[1 : j]$ . Die günstigsten Umformungen aller Teilsequenzen  $A[1 : p]$  und  $B[1 : q]$  mit  $p < i$  und  $q < j$  seien schon bekannt. Für die gesuchte Umformung kann man von folgenden Paaren ausgehen:

$$\begin{array}{ll} (A[1 : i - 1], B[1 : j - 1]) & \text{durch Ersetzung oder eine Übereinstimmung} \\ (A[1 : i - 1], B[1 : j]) & \text{durch Einfügen einer Lücke in } B \\ (A[1 : i], B[1 : j - 1]) & \text{durch Einfügen einer Lücke in } A \end{array}$$

Man wählt die Alternative mit den geringsten Kosten und fährt fort, bis man am Ende der beiden Sequenzen angelangt ist. Das Verfahren wird anschaulich, wenn man die Kosten für die Teilumformungen in eine Matrix einträgt. In der ersten Spalte und in der ersten Zeile stehen dann jeweils als Startwerte die Kosten für das Einfügen von Lücken.

Die Matrix in Abbildung 2.3 zeigt die Umformung der Buchstabenfolge *Istanbul* in *Lissabon*. Es wurde angenommen, daß die Kosten für das Einfügen von Lücken genau so groß sind, wie das Ersetzen eines Elementes. Als Beispiel sei der Eintrag in Zeile 4 und Spalte 3, kurz Feld (4, 3), erläutert. Dieses Feld kann erreicht werden von den Feldern (4, 2), (3, 2) und (3, 3). Da in beiden Städtenamen ein *S* steht, verursacht der Übergang in der Diagonalen keine Kosten. Da zudem der Wert in (3, 3) der kleinste in den vorhergehenden Feldern ist, übernimmt man diesen Wert in Feld (4, 3). Die kleinstmöglichen Gesamtkosten stehen in der Matrix rechts unten. Der Abstand der Städtenamen ergibt



		I	S	T	A	N	B	U	L
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
L	1	1	2	3	4	5	6	7	7
I	2	1	2	3	4	5	6	7	8
S	3	2	1	2	3	4	5	6	7
S	4	3	2	2	3	4	5	6	7
A	5	4	3	3	2	3	4	5	6
B	6	5	4	4	3	3	3	4	5
O	7	6	5	5	4	4	4	4	5
N	8	7	6	6	5	4	5	5	5

Abbildung 2.3: Berechnung des Abstandes zweier Sequenzen mittels *Sequence Alignment*

sich bei dieser Form des *Sequence Alignment* zu 5. Die entsprechende Umformung erhält man, indem man die Wege, auf denen das letzte Element der Matrix erreicht wird, zurückverfolgt.

Operation	S	M	M	X	M	S	M	X	X
A		I	S	T	A	N	B	U	L
B	L	I	S	S	A		B	O	N

Die Operationen sind S: *Lücke einfügen*, M: *Übereinstimmung*, X: *Ersetzen*.

Für die Tagebuchdaten ergibt sich für die Abstände die in Abbildung 2.4 gezeigte Verteilung. Obwohl je zwei Tagebücher in der Stichprobe von der gleichen Person stammen, gibt es so gut wie keine zwei identischen Aufzeichnungen. Die kleinsten Abstände haben einen Wert von 0.2. Etwa ein Drittel aller Abstände liegt unter 0.5. Auch sehr große Abstände sind selten. Das erklärt sich daraus, daß bei den Budgets immer Gemeinsamkeiten zu erwarten sind, allein wegen der Schlafenszeiten, die zudem auch zeitlich bei der großen Mehrheit der Aufzeichnungen auf die Nachtstunden fallen.

Trotz des effizienten Algorithmus' bleibt die Abstandsbestimmung mittels *Sequence Alignment* relativ aufwendig. Zudem werden die Abstände von Tagesabläufen, die in ihrem Aufbau regelmäßig sind, tendenziell kleiner sein, als die Abstände von Tagesabläufen mit großer Variation der Reihenfolge von Aktivitäten, wie dies zum Beispiel

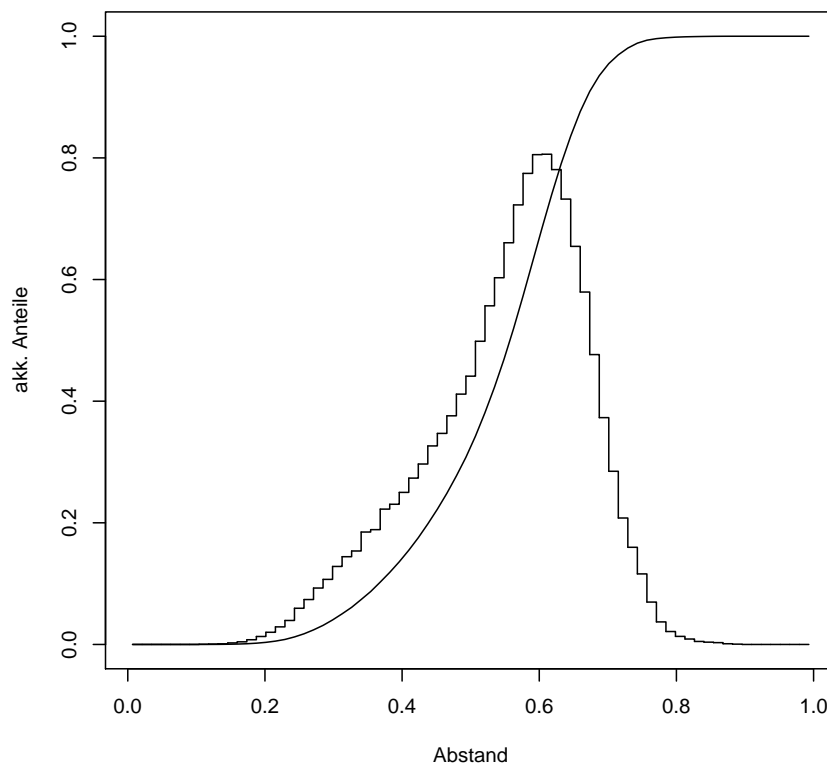


Abbildung 2.4: *Abstände aus dem Sequence Alignment: Häufigkeitsverteilung der Abstände und empirische Verteilungsfunktion*

bei Tagen der Fall ist, die von Betreuungszeiten für Kinder geprägt sind. Wenn hier die gleichen Aktivitäten vorliegen, aber die Reihenfolge vertauscht ist, so führt das *Sequence Alignment* dazu, daß nur jeweils einer der Aktivitätenblöcke als gemeinsam erkannt wird. Der Anfang der Tagesabläufe bei Null Uhr ist willkürlich und führt beim *Sequence Alignment* dazu, daß die zeitliche Nähe einer Aktivität, die in *A* kurz vor Mitternacht, in *B* aber kurz nach Mitternacht stattfindet, nicht erkannt wird. Im Beispiel oben betrifft das den Buchstaben *L* am Ende von *Istanbul* und am Anfang von *Lissabon*. Somit erscheinen die Abstände in Gruppen von Tagebüchern, in denen dieser Fall häufig ist (Samstage, Tage mit Schichtarbeit) vergrößert. Bei der Festlegung der Kosten für ein Einfügen oder Löschen eines Elementes ist zu ermitteln, wie weit Blöcke gegeneinander verschoben werden, bevor die Kosten für das Verschieben größer werden als die Kosten für eine Ersetzung [37].

### 2.3.3 Klassifikation der Tagebücher

Da die Zeitverwendung maßgeblich die Notwendigkeit für Wege bestimmt, ist das Verständnis ihrer Struktur von grundlegendem Interesse für die Verkehrsnachfragemodellierung. Dabei geht es zum einen darum, bei der Modellierung den vorhandenen Strukturen gerecht zu werden, und zum anderen erleichtert die Strukturierung die Einsicht in wesentliche Zusammenhänge.

Die Klassifikation wird hier in zwei Schritte gegliedert. Zunächst werden über ein Clusterverfahren sogenannte Kernklassen bestimmt, und in einem zweiten Schritt werden die Tagebücher einer dieser Kernklassen zugeordnet oder als nicht klassifizierbar bewertet. Dieses Verfahren hat den Vorteil, daß bei der Bestimmung der Kernklassen flexibel vorgegangen werden kann und daß dabei nicht die gesamte Distanzmatrix mit  $9 \cdot 10^8$  Elementen berechnet werden muß. Es wird stattdessen eine zufällig gezogene Unterstichprobe mit etwa der Hälfte aller Tagebücher verwendet.

#### Bildung von Kernklassen

Die Clusteranalyse ist eine sehr vielseitige Methode, um eine Menge von Daten, in der zunächst keine Struktur vorgegeben ist, zu gliedern [72, 41, 3]. Man unterscheidet hierarchische und nicht-hierarchische Verfahren, und unter den hierarchischen Verfahren wiederum eine divisive und agglomerative Vorgehensweise. Hier wird ein agglomeratives Verfahren verwendet. Man beginnt mit den einzelnen Tagebüchern, ermittelt das Paar, das den kleinsten Abstand hat, faßt dieses Paar zu einem Cluster zusammen und sucht nach dem nächsten kleinsten Abstand. Hierbei ist festzulegen, wie der Abstand zwischen Clustern berechnet wird, die sich im Laufe des Prozesses schon gebildet haben. Die gängigsten Methoden sind *complete linkage*, *single linkage*, *average linkage* und die Methode von Ward. Bei *complete linkage* und *single linkage* wird der größte, bzw. der kleinste Abstand aller Paare aus den Clustern verwendet. Bei der Methode von Ward werden nicht die nächsten Cluster zusammengefaßt, sondern diejenigen, deren Verschmelzung den geringsten Zuwachs an Heterogenität bedeutet, bezogen auf die gesamte Clusterstruktur. Die Methode des gewichteten *average linkage* hat den Vorteil, daß die Heterogenität der Cluster automatisch in jedem Schritt bekannt ist. Sie kommt hier zum Einsatz. Wenn die Cluster  $p$  und  $q$  zusammengefaßt werden, müssen in der Distanzmatrix die Abstände zu allen unbeteiligten Clustern  $i$  zum neu entstandenen Cluster  $r$  berechnet werden. Beim gewichteten *average linkage* ergibt sich dieser Abstand rekursiv aus den schon bekannten

Abstandswerten:

$$d_{r,i} = \frac{1}{n_r}(n_p d_{p,i} + n_q d_{q,i}),$$

$n_p, n_q$  und  $n_r$ : Größe der Cluster  $p, q$  und  $r$

$d_{p,i}$  und  $d_{q,i}$ : Abstände der Paare  $(p, i)$  und  $(q, i)$ .

Neben der Methode zur Zusammenfassung der einzelnen Cluster ist die Auswahl der Klassen innerhalb des entstandenen Baumes ein entscheidender Schritt des Verfahrens. Häufig wird ein globaler Wert für die Heterogenität festgelegt, den ein Cluster haben darf, und daraus ergibt sich die Zahl der Klassen. Bei den Zeitverwendungstagebüchern ist diese Vorgehensweise nicht sinnvoll, da es hier nicht nur auf den Absolutwert der Heterogenität in den Klassen ankommt. Es ist vielmehr sinnvoll, Klassen vergleichbarer

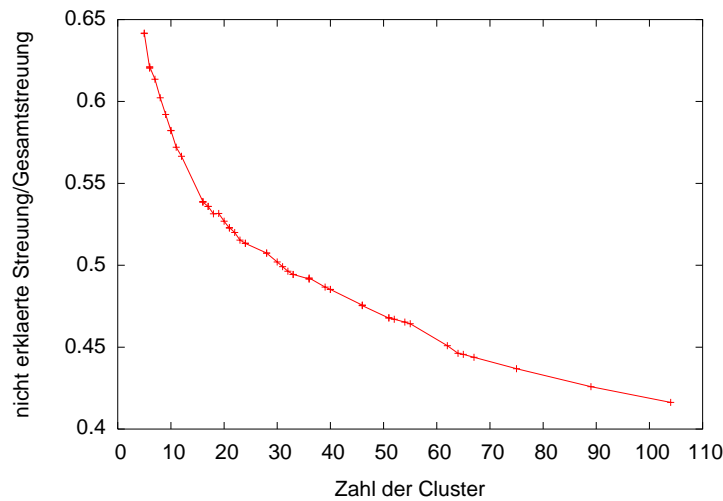


Abbildung 2.5: *Nicht erklärte Streuung in Abhängigkeit von der Zahl der Klassen. Die Cluster enthalten dabei auch die nachträglich wieder zugeordneten Elemente (siehe Seite 71 ff.).*

Größe zu bilden, die in ihrer Heterogenität verschieden sein können. Würde ein globaler Wert für die Heterogenität festgelegt, ergäben sich Klassen sehr unterschiedlicher Größe, daher wird der Clusterbaum vom Stamm ausgehend nach Zahl der Elemente in den Ästen bewertet, und es werden solche Knoten markiert, die zwei starke Äste tragen und solche, die am Ende eines Astes eine bestimmte Mindestgröße aufweisen. Man erhält dann dort, wo es möglich ist, eine feinere Aufgliederung der Tagesabläufe. Zur Bestimmung dieser Mindestgröße wird die sogenannte nicht erklärte Streuung  $\Gamma$  bezogen auf

die Gesamtstreuung betrachtet [3].

$$\Gamma = \frac{\sum_K (n_K - 1) \sigma_K^2}{n \sigma^2} \quad \text{mit} \quad \sigma^2 = \frac{1}{n \cdot (n - 1)} \sum_{i < j} d(x_i, x_j)^2$$

$\sigma_K$ : Varianz im Cluster  $K$ ,

$n_K$ : Zahl der Elemente in  $K$ ,

$x_i$ : Tagebuch  $i$ .

Der hier verwendete Ausdruck für die Varianz bezieht sich nur auf die Abstände zwischen den Elementen und nicht auf einen Mittelwert, da dieser für die Zeitverwendungstagebücher nicht definiert ist. In Abbildung 2.5 ist zu sehen, wie dieser Wert mit wachsender Klassenzahl abnimmt. Die Kurve verläuft zunächst recht steil und geht dann im Bereich von 15 bis 25 Klassen in einen flacheren Abschnitt über. Für die Klassifizierung im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Klassenzahl von 24 gewählt. Ihr entspricht eine Mindestgröße der Blätter von 210 Elementen. Abbildung 2.6 zeigt den entsprechenden Baum. Die Höhe im Baum gibt die Varianz des jeweiligen Clusters wieder, die Fläche der Knoten ist proportional zur Zahl der Elemente im jeweiligen Cluster.

### Zuordnung zu den Kernklassen

Das oben beschriebene Verfahren führt dazu, daß sich nur ein Teil der Tagebücher in den ausgewählten Kernklassen findet. Zudem wurde ja für die Clusterung nur die Hälfte der ursprünglichen Daten verwendet. Es ist daher ein zweiter Schritt nötig, bei dem die Tagebücher einer der Kernklassen zugeordnet werden oder als nicht klassifizierbar betrachtet werden. Dazu ist festzulegen, wie eine Kernklasse für eine Zuordnung ausgewählt wird. Drei Festlegungen des Abstands  $d(x_i, K)$  eines zuzuordnenden Elementes  $x_i$  zu einer Kernklasse  $K$  werden verglichen:

1. Der Abstand wird aufgefaßt als der Mittelwert der Abstände zu den Elementen der Kernklasse,

$$d(x_i, K) = \frac{1}{n_K} \cdot \sum_{x_j \in K} d(x_i, x_j) .$$

2. Der Mittelwert wird skaliert mit der Standardabweichung innerhalb der Kernklasse.

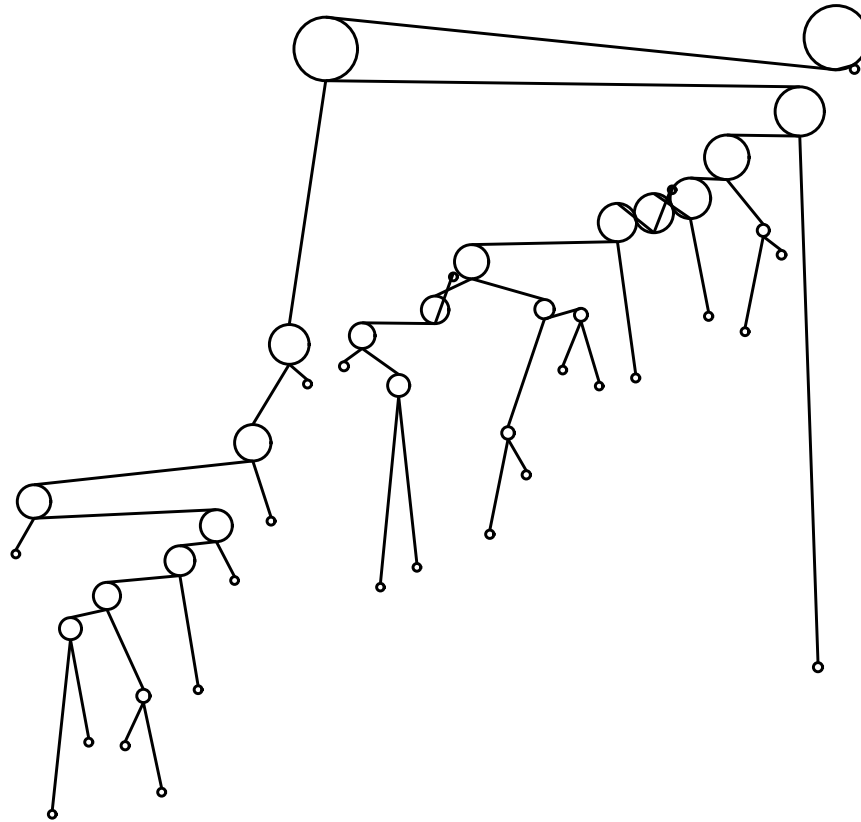


Abbildung 2.6: Klassen im Clusterbaum bei einer Mindestgröße der Blätter von 210 Elementen.

3. Die Abstände zu den einzelnen Elementen  $x_j$  der Kernklasse  $K$  werden bei der Mittelung gewichtet mit:

$$w(x_j) = \frac{1}{1 + \exp(\alpha \cdot (d(x_i, x_j) - \beta))} ,$$

und der Abstand zu  $K$  ist:

$$d(x_i, K) = \frac{1}{\sum_j w(x_j)} \sum_{x_j \in K} w(x_j) d(x_i, x_j) .$$

Damit werden Elemente der Kernklasse, die in der Nähe von  $x_i$  liegen, stärker berücksichtigt als weiter entfernte; Die Parameter  $\alpha$  und  $\beta$  bestimmen eine typische Entfernung.

$x_i$  wird jeweils der Kernklasse zugeordnet, zu der es den kleinsten Abstand hat, oder es wird als nicht klassifizierbar gewertet, wenn der Abstand über einer bestimmten

Schwelle liegt. Wenn als Abstand der Mittelwert gewählt wird (Fall 1), dann wachsen die homogenen Kernklassen sehr stark, während den inhomogenen Kernklassen nicht einmal alle Elemente zugewiesen werden, die nach dem Clusterverfahren diese Kernklasse ausmachen. Im Fall von 2 ist es umgekehrt: Die inhomogenen Kernklassen wachsen am stärksten, und der Wert für die nicht erklärte Varianz ist relativ groß. Die Abstandsbestimmung nach 3 zeigt eine ähnliche Tendenz wie 1, vermeidet aber, daß inhomogene Kernklassen stark schrumpfen. In Tabelle 2.2 ist die Zahl der nicht zuzuordnenden Ele-

Abstandsbestimmung	Schwelle	$n_o$	$S_c/S$
Mittelwert	0.4	5193	0.61
	0.5	840	0.52
	0.6	156	0.50
skalierter Mittelwert	1.5	5856	0.68
	2.0	115	0.57
Gewichtung	0.4	4560	0.59
	0.5	541	0.51
	0.6	119	0.50

Tabelle 2.2: *Verschiedene Festlegungen des Abstands zu den Kernklassen,  $n_o$  ist die Zahl der nicht klassifizierbaren Elemente,  $S_c/S$  ist die nicht erklärte Streuung. Insgesamt wurden für diesen Vergleich 15362 Zeitverwendungstagebücher zugeordnet.*

mente sowie die nicht erklärte Varianz für verschiedene Schwellenwerte, bei denen noch eine Zuordnung stattfindet, aufgeführt. Für die Bildung der Tagebuchklassen wurde die Abstandsbestimmung mit Gewichtung verwendet mit  $\alpha = 10$  und  $\beta = 0.5$ ; der Schwellenwert für die Zuordnung wird auf 0.5 festgelegt. Bei größeren Abständen erscheint die Zuordnung zu einer Klasse zweifelhaft, bei kleineren Abständen steigt die Zahl der nicht klassifizierbaren Tagebücher stark an.

### 2.3.4 Eigenschaften der Tagebuchgruppen

Tabelle 2.3 beschreibt die Tagebuchklassen anhand ihrer Größe und Varianz. Interessant ist natürlich auch, welche inhaltlichen Unterschiede sich ergeben. Es werden zunächst die Budgets für die einzelnen Aktivitäten verglichen, das heißt die Zeit, die im Mittel innerhalb der Gruppe für eine Aktivität aufgewendet wird. In Abbildung 2.7 sind die Budgets

Nummer	Pfad	Größe der Kernklasse	Standard-abweichung	Größe der Klasse	Standard-abweichung
0	nicht klass.	0	0.0	1369	0.52
1	ollll	219	0.23	571	0.25
2	olllrlll	222	0.14	3185	0.21
3	olllrlllr	233	0.16	1588	0.24
4	olllrlrl	248	0.16	1772	0.24
5	olllrllrr	229	0.15	1341	0.22
6	olllrlr	229	0.18	1107	0.25
7	olllrr	222	0.22	446	0.26
8	olllr	233	0.24	1134	0.29
9	olrr	234	0.29	462	0.28
10	olrlllllll	300	0.29	885	0.30
11	olrlllllrl	212	0.22	3214	0.29
12	olrlllllrr	219	0.22	2599	0.30
13	olrlllllr	228	0.32	630	0.32
14	olrlllllrl	255	0.23	2264	0.29
15	olrlllllrlr	250	0.26	1110	0.30
16	olrlllllrrl	221	0.29	528	0.30
17	olrlllllrrr	218	0.28	699	0.31
18	olrllllr	242	0.29	1039	0.31
19	olrlllr	218	0.35	172	0.33
20	olrlrr	245	0.31	562	0.32
21	olrlrl	227	0.30	671	0.32
22	olrlrr	278	0.33	438	0.32
23	olrr	307	0.19	2845	0.27
24	or	266	0.39	101	0.33

Tabelle 2.3: Die Tagebuchklassen: Der Pfad gibt den Weg im Clusterbaum zu der jeweiligen Klasse an, beginnend beim Stammknoten. Die erste Zeile beschreibt die nicht klassifizierbaren Elemente.



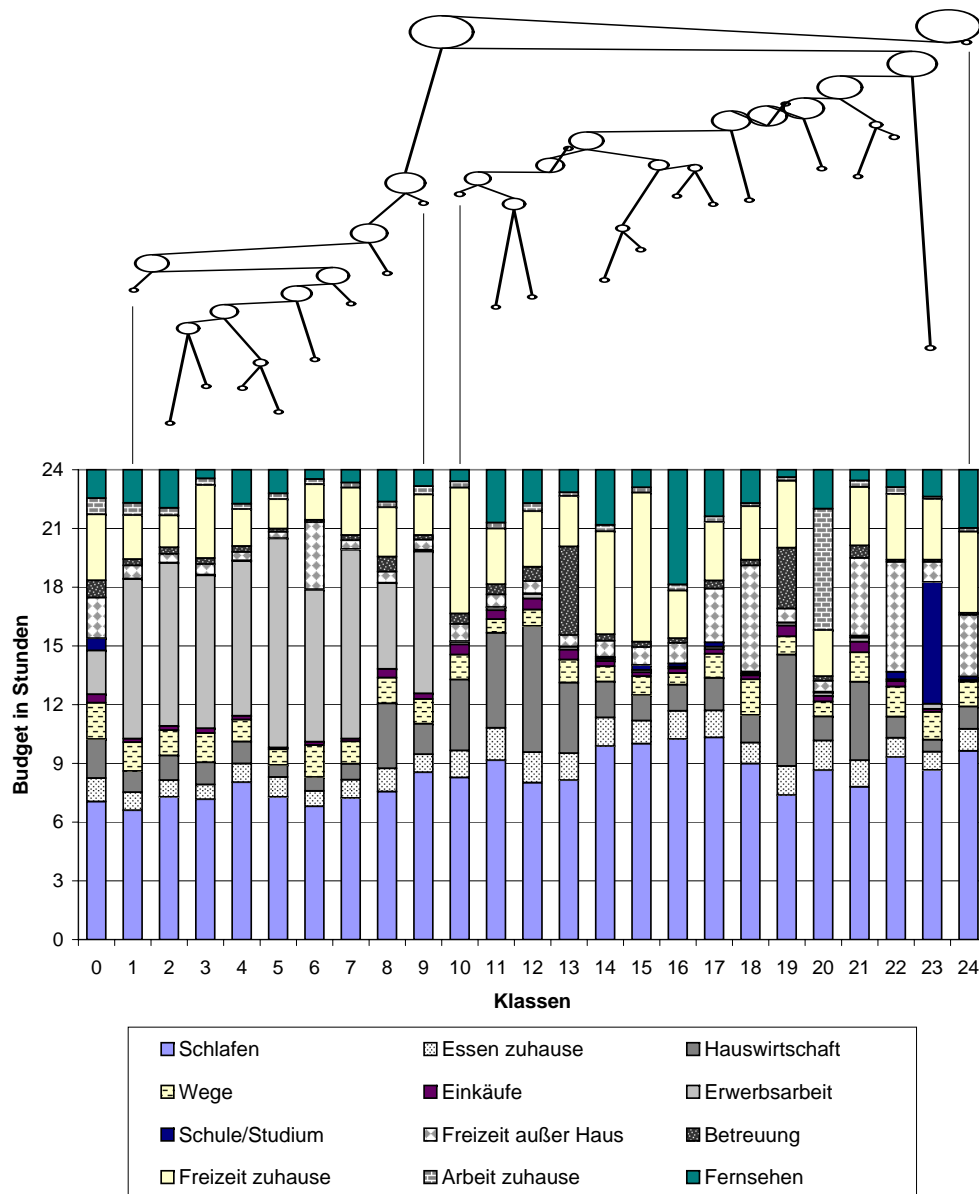


Abbildung 2.7: Klassen im Clusterbaum bei einer Mindestgröße der Blätter von 210 Elementen

zusammen mit dem Baum der Clusterung zu sehen. Die Balken für die einzelnen Klassen liegen dabei jeweils unter dem entsprechenden Blatt des Baumes. Das Maximum der Zeitskala sind die vierundzwanzig Stunden des Tages. Die Numerierung der Balken dient lediglich der Unterscheidung der Klassen. Der erste Balken mit der Nummer 0 zeigt die Budgets in den Tagebüchern, die sich nicht zuordnen ließen. Die Budgets machen schon

deutlich, welche Aktivitäten auf die Klassifizierung einen starken Einfluß haben. Aktivitäten wie *Schlafen*, *Essen zuhause*, *Hausarbeit*, *Wegezeiten*, *Freizeit zuhause* und *Fernsehen* kommen in allen Klassen vor, wenn auch mit deutlich unterschiedlichen Anteilen. *Erwerbsarbeit*, *Schulbesuch*, *Betreuung*, *Arbeit zuhause* und *Freizeit außer Haus* können dagegen als kennzeichnend für einzelne oder mehrere Klassen bezeichnet werden. Der Vergleich mit dem Clusterbaum macht deutlich, daß *Erwerbsarbeit* die Hauptäste innerhalb des Baumes trennt. Der Ast mit Tagen, die von Erwerbsarbeit geprägt sind, enthält die homogensten Blätter. Ähnlich homogen ist im anderen Ast nur die Klasse mit den Schultagen. Sie sind ein Beispiel dafür, daß eine einzelne Aktivität die Bildung einer eigenen Klasse provoziert. Ebenso verhält es sich mit Klasse 20, deren kennzeichnende Tätigkeit *Arbeit zuhause* ist. In den Klassen 13 und 19 sind es Zeiten für die Betreuung von Familienmitgliedern. Klasse 6 zeichnet sich innerhalb der Arbeitstage durch ein Budget von knapp drei Stunden für *Freizeit außer Haus* aus. Größere Anteile an *Hausarbeit* finden sich in 8, 10 bis 13, 19 und 21.

Da die Budgets den Zeitpunkt, zu dem verschiedene Aktivitäten ausgeübt werden, nicht erkennen lassen, erscheinen einige der Tagebuchklassen sehr ähnlich. Einer der entscheidenden Vorteile der mikroskopischen Betrachtung besteht aber darin, den zeitlichen Ablauf des Verkehrsgeschehens modellieren zu können. Die Methode des *Sequence Alignment*, die zum Vergleich der Tagebücher verwendet wurde, bezieht zeitliche Verschiebungen mit ein. Wie in Abbildung 2.8 zu sehen, unterscheiden sich die beiden von Vollzeit-Erwerbstätigkeit geprägten Klassen mit ähnlichen Budgets deutlich in ihrem tageseitlichen Verlauf: Die Breite der Streifen entspricht dem Anteil der Tagebücher, die für einen bestimmten Zeitpunkt die jeweilige Aktivität enthalten. In Klasse 1 beginnen die Menschen schon ab vier Uhr, ihr Zuhause zu verlassen. Bis sechs Uhr ist der Anteil derjenigen, die einer Erwerbsarbeit nachgehen, auf nahezu 100% gestiegen, um dann aber schon in den frühen Nachmittagsstunden wieder zu sinken. Die Erwerbsarbeit wird von anderen Aktivitäten außer Haus abgelöst, oder die Menschen kehren wieder in ihre Wohnungen zurück. Die berichteten Wegzeiten sind am Morgen stärker konzentriert als abends und lassen die Verknüpfung von verschiedenen Aktivitäten durch Ortswechsel deutlich erkennen. In der Tagebuchklasse 4 beginnt die Erwerbsarbeit deutlich später als in Klasse 1. Es gibt offensichtlich etliche Personen, die über die Mittagszeit nach Hause fahren, was in Klasse 1 überhaupt nicht zu beobachten ist. Das Ende der Arbeitszeit ist noch stärker als der Beginn zu späteren Tageszeiten hin verschoben. Es ist außerdem weniger einheitlich als in Klasse 1, und sonstige Aktivitäten außer Haus sind seltener.

Die Struktur der Zeitverwendung in den von Freizeitaktivitäten außer Haus gepräg-

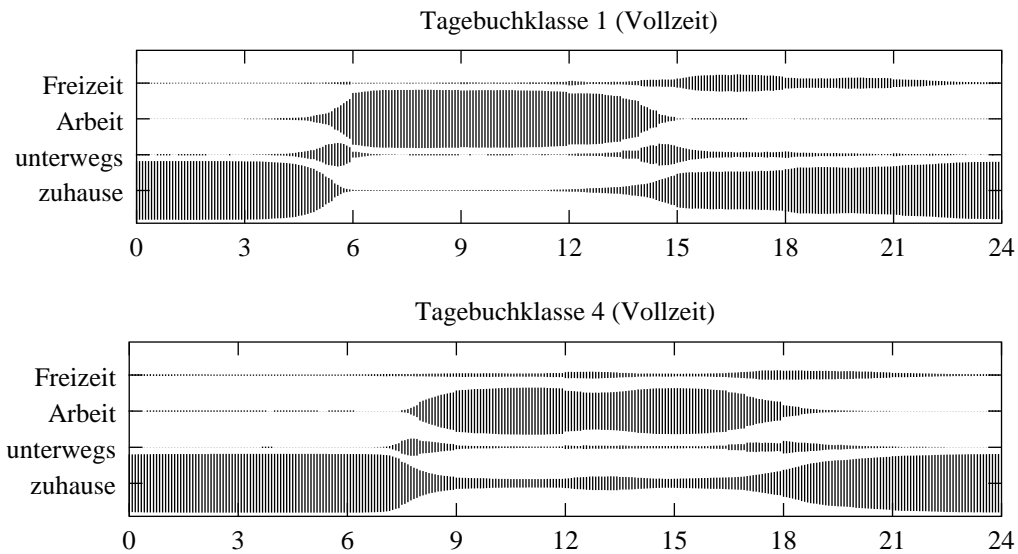


Abbildung 2.8: Anteile verschiedener Aktivitäten in den Tagebüchern der Klassen 1 und 4 zwischen 0 Uhr und 24 Uhr.

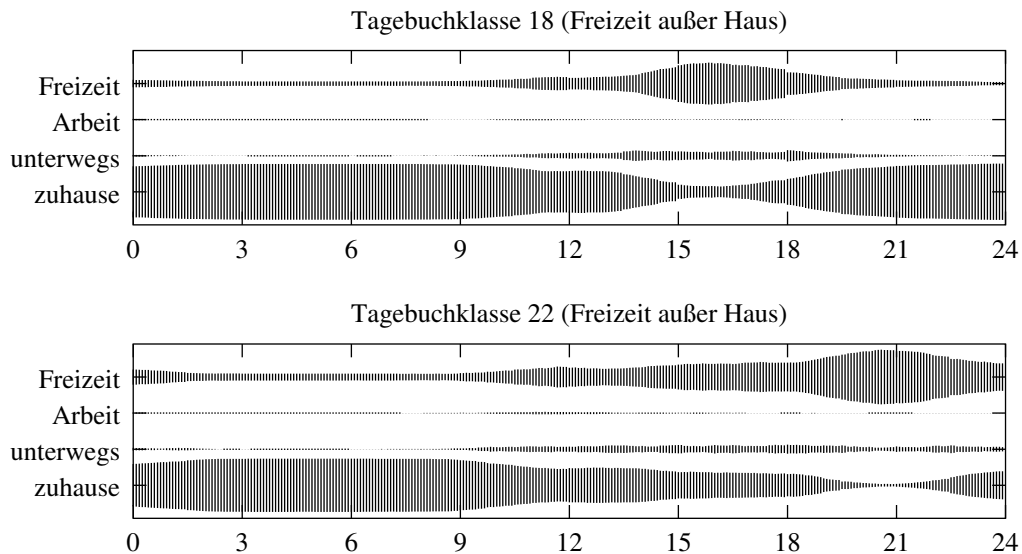


Abbildung 2.9: Anteile verschiedener Aktivitäten in den Tagebüchern der Klassen 18 und 22 zwischen 0 Uhr und 24 Uhr.

ten Klassen 18 und 22 ist völlig anders als diejenige der gerade vorgestellten Klassen, in denen die Erwerbsarbeit bestimmend ist. Wieder findet sich bei ähnlichem Budget eine tageszeitliche Verschiebung. Die Freizeitaktivitäten beginnen in Klasse 18 um neun Uhr, und ihr Anteil erreicht sein Maximum am frühen Nachmittag. Auch in Klasse 22 wächst der Anteil der Freizeitaktivitäten erst allmählich. Um 21 Uhr sind so viele Menschen

außer Haus wie sonst nie im Verlauf des Tages. Der Zeitpunkt, zu dem Ortswechsel stattfinden, ist in diesen Klassen kaum einzugrenzen im Gegensatz zu den Tagesverläufen mit Erwerbstätigkeit.

### 2.3.5 Vergleich der Wochentage

Bei der Prognose der Verkehrsnachfrage ist zu bedenken, ob neben dem Zyklus des Tages weitere Zyklen berücksichtigt werden müssen. Wenn sich die einzelnen Wochentage deutlich voneinander unterscheiden, dann sollten sich die Ergebnisse eines Modells sinnvollerweise auch auf einzelne Wochentage beziehen. Anhand der Tagebücher der Zeitbudgeterhebung und der vorliegenden Klassifikation werden die Wochentage paarweise miteinander verglichen und ein  $\chi^2$ -Test durchgeführt. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 2.4. Nicht nur Samstag und Sonntag auch der Freitag ist in Bezug auf die Häufigkeit in den Tagebuchklassen von allen anderen Tagen signifikant unterschieden. Der Montag hat ebenfalls eine Sonderrolle, die aber nicht so stark ausgeprägt ist, und auf einem Fehlerniveau von 5% ist er vom Dienstag nicht mehr zu unterscheiden. Die übrigen Wochentage (Dienstag, Mittwoch und Donnerstag) bilden eine Gruppe, innerhalb derer keine signifikanten Unterschiede in den Verteilungen feststellbar sind. In den Anwendungsbeispielen werden die Tagebücher dieser Gruppe für die Modellierung verwendet. Die Zusammenfassung von drei Tagen ermöglicht eine größere Ausgangsmenge für die Zuweisung von Zeitverwendungsmustern.

	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So
Montag	31.9	38.4*	44.2**	125.6***	2564***	3654***
Dienstag		20.7	16.3	102.1***	2592***	3754***
Mittwoch			18.3	74.6***	2538***	3684***
Donnerstag				90.4***	2523***	3567***
Freitag					2301***	3498***
Samstag						875***

Tabelle 2.4:  $\chi^2$ -Werte beim paarweisen Vergleich der Anteile der Tagebücher an den Tagebuchklassen für die Wochentage. \*:  $p < 0.05$ ; \*\*:  $p < 0.01$ ; \*\*\*:  $p < 0.001$

## 2.4 Korrektur von Touren

Die Tagebücher der Zeitbudgeterhebung enthalten neben den Aktivitätencodes für jedes Zeitintervall auch den Ort der Ausübung mit den Ausprägungen *zu Hause* und *nicht zu Hause*. Häufig wechselt der Ort der Ausübung, ohne daß ein Weg angegeben wird. Es ist nun zu entscheiden, wie mit solchen Fällen im Datensatz umgegangen werden soll. Es kann sein, daß tatsächlich kein Weg nötig war, zum Beispiel bei Arbeiten im Garten, die sich direkt an Aktivitäten im Haus anschließen können, oder es wurde vergessen, den Weg zu berichten. Bei Tagebüchern, wo dies plausibel erscheint, werden Wege ergänzt.

Innerhalb von Touren werden Aktivitäten zusammengefaßt, wenn keine Wege berichtet wurden. Es wird also angenommen, daß die Aktivitäten am gleichen Ort ausgeführt wurden. Die Aktivität mit der längsten Dauer wird um die Zeittakte der anderen Aktivitäten zwischen den Fahrten verlängert, da die Suche nach Orten, wo mehrere Aktivitäten ausgeführt werden können, mit der vorhandenen Datenbasis nicht sinnvoll ist. Für Aktivitäten, die nicht zu Hause stattfinden aber nicht von Wegen eingerahmt sind, werden Wege eingefügt, oder die Aktivitäten werden mit anderen zusammengelegt. Ist die Aktivität die einzige Aktivität einer Tour und kürzer als vier Zeittakte, wird sie mit der vorangehenden oder nachfolgenden Aktivität zu Hause zusammengelegt, weil davon ausgegangen wird, daß sie in unmittelbarer Nähe des Hauses stattfindet. Ebenso wird verfahren mit Aktivitäten, die am Anfang oder Ende einer Tour stehen, wenn sie weniger als drei Zeittakte belegen. Es handelt sich dabei zum Beispiel um Gespräche, die nicht mehr im Haus aber noch vor der Fahrt stattfinden. Bei längeren Aktivitäten wird davon ausgegangen, daß Wege fälschlicherweise nicht berichtet wurden, oder als unbedeutend empfunden wurden. Es werden jeweils Wege eingesetzt. Die Fehleinschätzungen, die entstehen, falls es tatsächlich keine Wege gab, sollte nicht sehr groß sein, da die Ortsauswahl in der Modellierung sich nach der Art der Aktivität richtet, so daß für Aktivitäten, die in der Umgebung des Wohnstandortes wahrscheinlich sind, auch entsprechend selten weite Wege eingeplant werden.

## 2.5 Zusammenhang von soziodemographischen Variablen und Zeitverwendung

Wie in Abschnitt 2.1 erläutert, ist der Leitgedanke des Modells, daß Menschen einen gewissen Spielraum haben, der die Möglichkeiten ihrer Zeitverwendung vorgibt. Die Aufgabe der Modellierung besteht dann darin, festzulegen, wie groß dieser Spielraum ist,

Veränderung	Zahl der betroffenen Tagebücher
keine	5870
Aktivitäten zusammengefaßt zu einer Aktivität, die mehr als die Hälfte der Gesamtdauer aller Aktivitäten an einem Ort ausmacht	12499
Aktivitäten zusammengefaßt zu einer Aktivität, die weniger als die Hälfte der Gesamtdauer aller Aktivitäten an einem Ort ausmacht	2272
Wegezeiten eingefügt	9848
Kurze Aktivitäten außer Haus vernachlässigt	2117
Kurze Aktivitäten zuhause vernachlässigt	15852
Aktivitäten zuhause zusammengefaßt, als Folge der Vernachlässigung einer kurzen Aktivität außer Haus	580
ganzer Tag außer Haus	451

Tabelle 2.5: Übersicht über die Korrekturen von Touren

welche Umstände bei dieser Festlegung eine Rolle spielen und zu beschreiben, was innerhalb dieses Spielraums geschieht. In diesem Abschnitt geht es um die Auswirkungen, welche die gesellschaftliche Rolle eines Menschen auf seine Zeitverwendung hat. *Gesellschaftliche Rolle* bedeutet in diesem Zusammenhang schlicht die Zusammenfassung von persönlichen Merkmalen und von langfristig festgelegten Entscheidungen und Bindungen, welche die Menschen eingegangen sind. In einem ersten Schritt geht es darum, festzustellen, welche dieser Entscheidungen und Bindungen, die sich in soziodemographischen Variablen niederschlagen, in Bezug auf die gewählte Beschreibung der Zeitverwendung in 24 Tagebuchklassen relevant sind.

Um eine möglichst große Flexibilität zu erreichen, was die Auswirkung der Kombination von Ausprägungen in verschiedenen Variablen angeht, ist eine sehr feine Partition der Teilnehmer der Zeitbudgeterhebung mit möglichst vielen Kombinationen der Ausprägungen der Ausgangspunkt der Analyse. Um allzu kleine Klassen in der Ausgangspartition zu vermeiden, ist eine thematisch begründete Vorauswahl der betrachteten Variablen zu treffen. Es werden die Variablen *Alter*, *Geschlecht*, *Schulbildung*, *Berufs-*

Variable	Kategorien (n)
Geschlecht	männlich/weiblich (2)
Alter	bis 16, 21, 42, 64, 85, 92 Jahre (6)
Schulbildung	ohne, Haupt-/Volksschule, höher (3)
Berufsbildung	ohne, Lehre/ Praktikum, höher (3)
Jobstatus	selbständig, angestellt, sonst erwerbstätig, im Ruhestand, arbeitslos, im Haushalt, in der Schule, (7)
Kinder unter 6 Jahren im Haushalt	keines, eines, zwei oder mehr (3)
Erwachsene im Haushalt	eine(r), zwei oder mehr (2)

Tabelle 2.6: soziodemographische Variablen zur Bildung der Ausgangspartition (siehe Text).

ausbildung, beruflicher Status, Zahl der Kinder unter 6 Jahren im Haushalt und die Zahl der Erwachsenen im Haushalt ausgewählt. In Tabelle 2.6 sind außerdem die jeweils betrachteten Ausprägungen aufgeführt. Es ergeben sich theoretisch 4536 Kombinationen, von denen allerdings nur 655 in der Stichprobe der Personen, die Tagebücher ausgefüllt haben, vorkommen. Die Personengruppen für die Zuordnung der Tagebücher erhält man, indem man solche Klassen zusammenfaßt, deren Anteile an den Tagebüchern in den Tagebuchklassen ähnlich sind: Es wird wieder ein Clusterverfahren verwendet, wobei die Elemente der Clusterung die Klassen der Ausgangspartition sind und der Abstand gegeben ist durch

$$d(A, B) = \sum_{k=1}^{24} \frac{n_k}{n} \left| x_k^{(A)} - x_k^{(B)} \right|$$

$n_k$ : Zahl der Tagebücher in Klasse  $k$ ,

$x_k^{(A)}, x_k^{(B)}$ : Anteil der Tagebücher in  $k$  für  $A, B$ .

Die Zahl der Cluster bestimmt sich wiederum danach, ob eine feinere Unterteilung noch einen nennenswerten Zuwachs an erklärter Varianz liefert. Sie wird in diesem Fall auf zwölf festgelegt. Die Cluster werden beschrieben durch diejenigen soziodemographischen Variablen, welche die Klassifizierung am besten nachvollziehen. Die verschiedenen Personenkategorien sind in Tabelle 2.7 aufgeführt. Es zeigt sich, daß erwartungsgemäß die durch den beruflichen Status gegebene Hauptbeschäftigung die größte Bedeutung für die Bildung der Kategorien hat. Die größeren Kategorien lassen sich dann weiter

Kategorie	Kürzel	Ø Alter	Frauen [%]	Größe
Rentnerinnen	RF	68	100.0	928
Rentner	RM	67	0.0	720
Arbeitsuchende	JS	43	54.1	738
Studierende/Schüler	PP	16	48.5	2349
Angestellte (m)	EM	39	0.0	4207
Angestellte (w) mit K.	EFC	32	100.0	736
Angestellte (w) unter 42	EF42	32	100.0	1648
Angestellte (w) über 42	EF92	51	100.0	1249
Hausfrauen unter 42	HW42	35	98.5	715
Hausfrauen über 42	HW92	54	98.2	836
Selbständige	FL	45	28.4	1135
andere Berufstätige	O	37	91.2	102

Tabelle 2.7: *Personenkategorien zur Zuordnung von Zeitverwendungsmustern. Die Kürzel werden verwendet in Abbildung 2.10.*

nach dem Geschlecht untergliedern, und bei den Frauen spielt für die Zeitverwendung eine Rolle, ob Kinder im Haushalt sind, die Betreuung erfordern.

Die Kreuztabelle, gebildet aus den Personenkategorien und den Tagebuchgruppen, läßt die Besonderheiten der Personenkategorien erkennen. In der Darstellung (Abbildung 2.10) entspricht die Fläche der Kreise dem Anteil der Tagebücher in einer Tagebuchklasse für die jeweilige Personenkategorie. Die Summe in den Spalten ergibt jeweils hundert Prozent. Wenn man die Tagebuchklassen mit den Aktivitäten kennzeichnet, die im Vergleich zu den anderen Klassen im Budget eine besondere Rolle spielen, dann fällt auf, daß die klassische Arbeitsteilung zwischen Männern und Frauen viele der Elemente der Tabelle erklären kann. Die von Hausarbeit geprägten Tagesabläufe sind vorwiegend Frauen vorbehalten mit Ausnahme der Rentner, deren Tagesabläufe zu 27 Prozent in eine der Hausarbeitsklassen fallen. Teilzeitbeschäftigungen spielen ebenso nur in den weiblichen Personengruppen eine größere Rolle. Bemerkenswert ist, daß es Klassen von Arbeitstagen gibt (Vollzeit 4 und Vollzeit 5), die bei Selbständigen deutlich häufiger vorkommen als in anderen Personenkategorien. Bei der Interpretation von Abbildung 2.10 ist zu beachten, daß die Tagesabläufe in den Klassen komplexer sind als es die Bezeichnungen suggerieren (siehe oben).



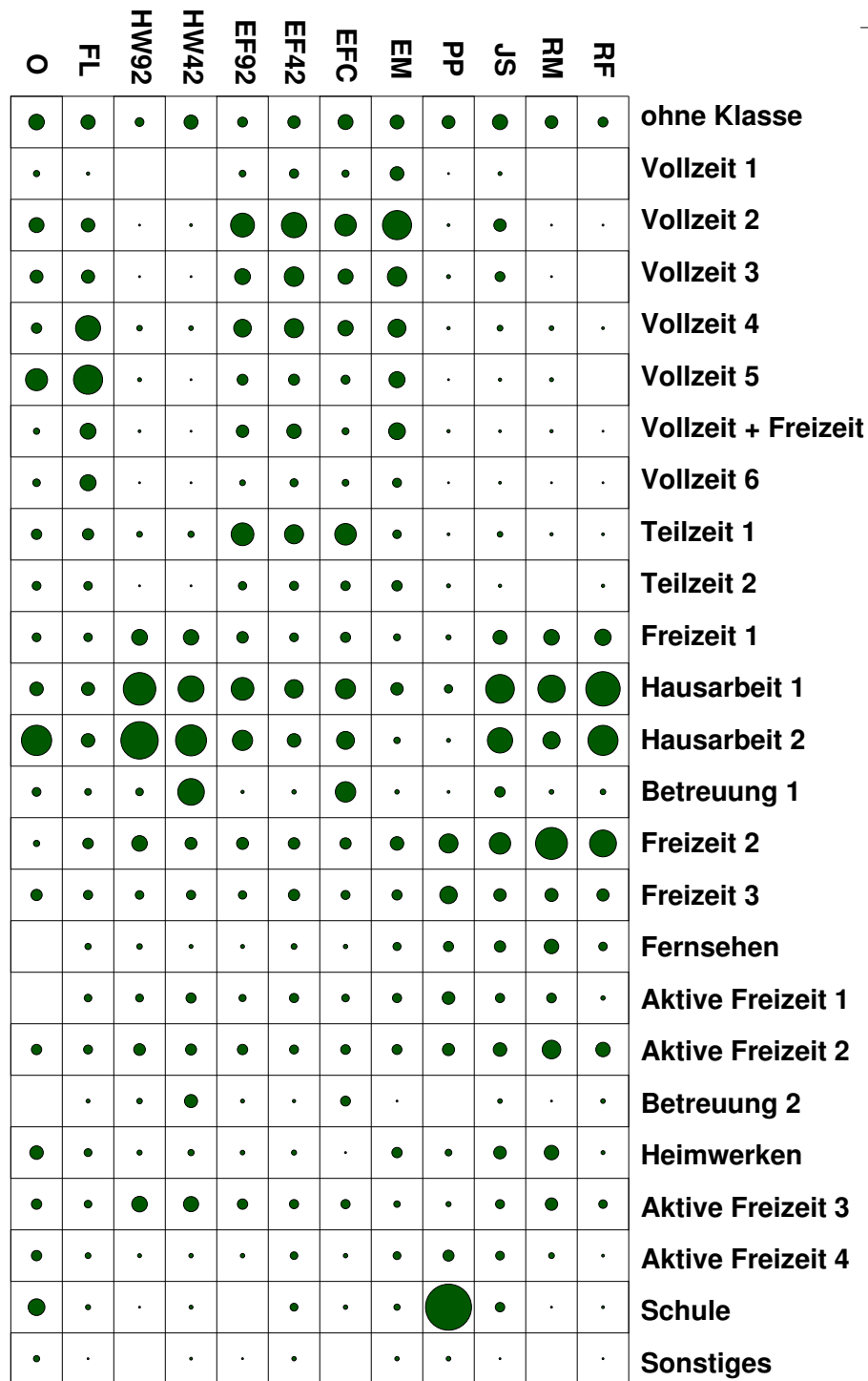


Abbildung 2.10: Anteil der Tagebücher in den Tagebuchklassen nach Personenkategorien.

## 2.6 Orts- und Verkehrsmittelwahl

Die Frage, wie Menschen die Orte für ihre Aktivitäten auswählen, hat eine zentrale Bedeutung für das Gesamtmodell. Hier entscheidet sich, wie sich die Ausübung von Aktivitäten in die Notwendigkeit, sich im Raum zu bewegen, übersetzt. Die Ortsauswahl hat drei Aspekte, mit denen man sich in der Modellierung auseinandersetzen muß. Zum einen übertragen sich die Zeitskalen, auf denen über die Ausübung von Aktivitäten entschieden wird, auf die Auswahl der Orte. Wohnorte und Arbeitsorte können zum Beispiel für Jahre unverändert bleiben. Es gibt ferner Aktivitäten, deren Orte eine ähnliche zeitliche Konstanz aufweisen, die aber dennoch leichter zu wechseln sind, wie zum Beispiel der Besuch eines Friseurs oder eines Arztes, zum Teil auch regelmäßige Einkäufe. Schließlich gibt es Aktivitäten, deren Orte von spontanen Entscheidungen abhängen, was für Freizeitaktivitäten zutrifft, sofern sie keinen verbindlichen Charakter haben, wie zum Beispiel Chorproben oder das Training in einem Sportverein. Die Zeitskala braucht in einem Modell des täglichen Verkehrsaufkommens nicht explizit abgebildet zu sein, sie hat aber einen gewissen Einfluß auf den zweiten Aspekt. Das ist die Einschätzung der Kosten, die für eine Fahrt oder einen Weg aufgewendet werden. Wege kosten in erster Linie Zeit, dazu kommen Beförderungsentgelte oder die Kosten für ein eigenes Fahrzeug und die körperliche Anstrengung, die bei Wegen mit dem Fahrrad oder zu Fuß auch berücksichtigt werden muß. Wenn Orte längerfristig festgelegt sind, wird die Bedeutung der entsprechenden Aktivitäten in der Regel groß sein, und man wird höhere Kosten für die Fahrten in Kauf nehmen. So hat zum Beispiel Holz-Rau in einer Studie am Beispiel von Berlin gezeigt, daß Menschen, die aus der Innenstadt ins Umland ziehen, auch nach dem Umzug an bestimmten Orten in der Innenstadt festhalten, obwohl die Fahrt dorthin jetzt mit einem größeren Aufwand verbunden ist [39].

Die Auswahl von Orten hängt drittens nicht nur von Überlegungen dessen ab, der Aktivitäten ausüben will, sondern auch vom Angebot. Ein mikroskopisches Modell muß also Aussagen darüber machen, welche Alternativen den Personen überhaupt zur Verfügung stehen, was davon bestimmt wird, welche Orte für welche Aktivitäten als geeignet angesehen werden. Die systematische Untersuchung des Auswahlprozesses wird durch die unterschiedlichen Einteilungen des Aktivitätenspektrums in verschiedenen Erhebungen und bei der Beschreibung der synthetischen Stadt erschwert. Dieses Problem wird nicht verschwinden, da sich das Aktivitätenspektrum der Menschen selbst im Laufe der Zeit verändert. Bei der Zuordnung von Aktivitäten zu Orten gibt es den Spezialfall, daß die Akteure bei der Belegung von Orten zueinander in Konkurrenz stehen. Am offen-

sichtlichsten ist dies im Fall der Arbeits- und Ausbildungsplätze. Hier kann nicht jede Person ihre Wahl unabhängig von den anderen treffen.

### Intervening Opportunities

Im Modell der *intervening opportunities* [78, 59] geht man davon aus, daß Menschen versuchen, die Kosten, die mit Wegen verbunden sind, zu minimieren. So könnte man sich also darauf beschränken, für jede Aktivität den jeweils nächsten Ort zu suchen. Für mehrere Aktivitäten in einer Tour wäre das Ziel der Suche eine Kombination von Orten, die den kürzesten Gesamtweg erfordert. Ein Problem in der Umsetzung dieses Grundgedankens ergibt sich daraus, daß man hierfür exakt wissen müßte, was die einzelnen Personen als mögliche Alternativen betrachten. Für eine kulturelle Veranstaltung mögen für den einen nur Theaterhäuser und Opern in Betracht kommen, während für einen anderen vor allem Kinos und Jazzkneipen wichtig sind. Wenn jemand einen Hausarzt aufsuchen will, ist die Zahl der Alternativen auf eins beschränkt, weil er eben genau zu seinem Hausarzt will, ähnlich wird es in den meisten Fällen mit dem Friseur sein, oder sogar mit der Buchhandlung. Die Frage der Alternativen ist also direkt mit der Frage der Differenzierung der Aktivitäten verknüpft und selbst bei größter Anstrengung in dieser Richtung wird man nicht soweit kommen können, daß man für jede Person den Hausarzt und die Stammkneipe erhebt, abgesehen davon, daß das Modell dann sehr unflexibel und nur mit sehr großem Aufwand überhaupt einsetzbar wäre. Der Lösungsansatz der *intervening opportunities* besteht nun darin, anzunehmen, daß eine Alternative aus der vorgeschlagenen Alternativenmenge mit der Wahrscheinlichkeit  $q$  abgelehnt wird, sei es, weil der Ort der Person nicht bekannt ist, sei es, weil er von der Person für die entsprechende Aktivität nicht in Betracht gezogen wird, oder weil der Ort aufgrund individueller Vorlieben den Ansprüchen der Person nicht genügt. Für die Umsetzung im Modell heißt das, daß die Alternativen nach ihrer Reisezeit geordnet werden müssen, und daß dann ein Ort entsprechend der modifiziert geometrischen Verteilung gewählt wird, denn sie beschreibt gerade die Wahrscheinlichkeit, daß die  $i$ -te Alternative gewählt wird, während die erste bis zur  $(i - 1)$ -ten Alternativen verworfen wurden:

$$f(i; q) = q^{(i-1)}(1 - q) .$$

### Verkehrsmittelwahl

Da die Ziele nach der Reisezeit geordnet werden müssen, ist bereits bei der Zielwahl schon zu berücksichtigen, welches Verkehrsmittel jeweils in Betracht kommt. Hier wird

so verfahren, daß für jedes Ziel ein Verkehrsmittel bestimmt wird. Je häufiger ein Verkehrsmittel vorkommt, desto größer ist sein Gewicht bei der Bestimmung der Reisezeiten für die Auswahl unter den Zielen.

Die Verkehrsmittelwahl beruht auf einem Entscheidungsbaum, der aus beobachtetem Verhalten konstruiert wird. Im Verfahren des CHAID, *Chi-Squared Automatic Interaction Detection*, wird unter den unabhängigen Variablen jeweils diejenige gesucht, für die sich die am besten abgesicherte Aufteilung der Probenmenge finden läßt [44, 70]. Für jede der Teilmengen wird dann rekursiv wieder eine Aufteilung gesucht bis entweder keine signifikante Aufteilung mehr gefunden werden kann, eine Mindestgröße der Teilmengen unterschritten ist oder ein vorgegebenes Maximum an Stufen erreicht ist. Der Datensatz für die Schätzung des CHAID-Baumes stammt von der deutschlandweiten Erhebung *Mobilität in Deutschland 2002* [13, 16]. 100 000 Personen wurden über alle ihre Fahrten im Laufe eines Tages befragt. Für den CHAID-Baum wurden nur jene 44 000 Wege berücksichtigt, die — nach der Einteilung des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung [12] — in Kreisen des Typs 1 und 2 (höchste Verdichtung) unternommen wurden, entsprechend der geplanten Anwendung des Modells. Tabelle 2.8 zeigt, wie oft welche Variable in den verschiedenen Stufen des Entscheidungsbaumes für die Aufteilung eines Knotens ausgewählt wird. Die letzte Spalte enthält den Anteil der Fälle unterhalb dieser Knoten. Die Variable *Zahl der Autos im Haushalt* teilt den Wurzelknoten und damit sind notwendigerweise alle Fälle nach dieser Variablen unterschieden. Auf der zweiten Stufe werden vier von fünf Knoten nach der Entfernung aufgeteilt, einer nach dem Alter der Person, die den Weg zurücklegt. Für die ersten beiden Ebenen des Entscheidungsbaumes mit der Verteilung der Verkehrsmittel zeigt Abbildung 2.11. Der starke Einfluß der Entfernung auf die Verkehrsmittelwahl ist sichtbar, ebenso wie die sinkende Nutzung von öffentlichen Verkehrsmitteln mit steigender Pkw-Verfügbarkeit.

Variable	Zahl der Knoten					Fälle
	Stufe					
	1	2	3	4	5	
Autos im Haushalt	1					100.0 %
Entfernung		4	5			95.7 %
Alter		1	7			80.8 %
Wegezzweck				7		30.9 %
Geschlecht				2	7	33.3 %

Tabelle 2.8: Struktur des CHAID-Baumes zur Verkehrsmittelwahl

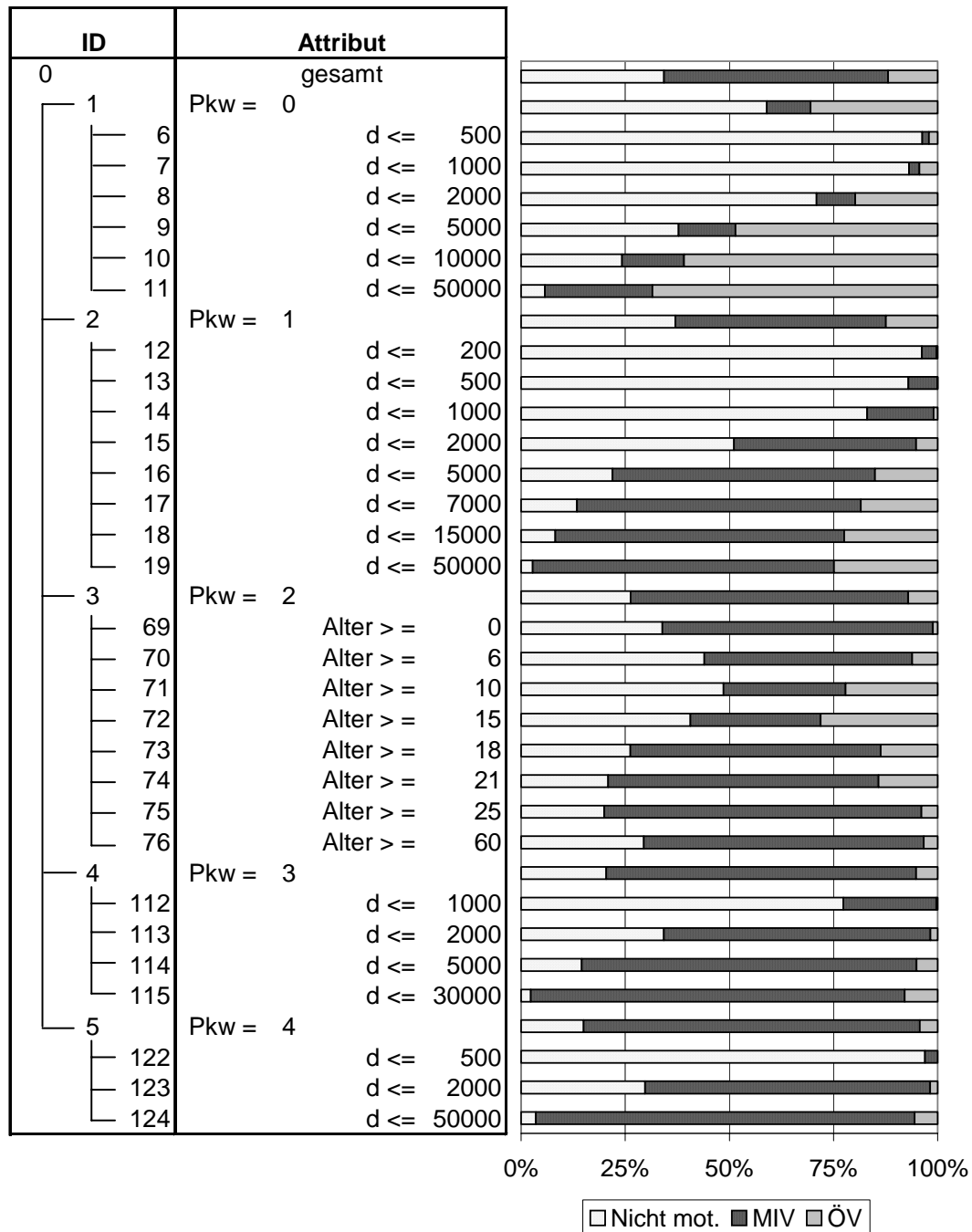


Abbildung 2.11: Verteilung der Verkehrsmittel in den Knoten der ersten beiden Ebenen des Entscheidungsbaumes. Pkw: Zahl der Pkw im Haushalt; d: Entfernung in Metern.

Für die Wege, die in einer Tour verbunden sind, können die Verkehrsmittel nicht unabhängig gewählt werden. Ein individuelles Verkehrsmittel wird in aller Regel für die gesamte Tour verwendet, oder für keinen der Wege. Daher werden die Aufenthalte außer Haus einer Tour im Modell nach ihrer Dauer unterschieden, und für den längsten Aufenthalt wird zuerst ein Verkehrsmittel gewählt. Das Ergebnis dieser Wahl bestimmt die Verkehrsmittelwahl für die Aufenthalte, für die der Hinweg oder Rückweg (in diesem Bild) unterbrochen wird. Wenn ein individuelles Verkehrsmittel gesetzt ist, wird es weiter verwendet, andernfalls sind die individuellen Verkehrsmittel nicht in der Alternativenmenge (siehe Abbildung 2.12).

Die Zahl der Personenkraftwagen wird in der synthetischen Bevölkerung bezogen auf Haushalte erfaßt. Dies trägt der Tatsache Rechnung, daß Pkws in der Regel gemeinschaftlich in Haushalten genutzt werden. Die Mindestanforderung an die Modellierung ist, daß verhindert wird, daß Fahrzeuge gleichzeitig von verschiedenen Personen genutzt werden. Dazu wird bei der Verkehrsmittelwahl zunächst festgestellt, wieviele Autos für den Zeitraum der Tour im Haushalt noch vorhanden sind. Diese Zahl wird dann für die Bestimmung der Auswahlwahrscheinlichkeit im CHAID-Baum verwendet. Das bedeutet, daß für diejenigen Person, deren Wege zuerst geplant werden, die Nutzung der Pkw wahrscheinlicher ist. Da die Personen innerhalb des Haushalts in zufälliger Reihenfolge bearbeitet werden, gibt es im Modell keine Bevorzugung bestimmter Personengruppen.

### **Strukturierung der Menge der Ziele**

Bei der Auswahl eines Ortes kommt je nach Untersuchungsgebiet eine große Zahl von Alternativen in Betracht. Wenn man die Vorzüge der mikroskopischen Modellierung nutzen möchte, die es erlaubt, die Entwicklung der Reisezeiten im Verlauf des Tages zu berücksichtigen, kostet die Berechnung der Reisezeiten für jeweils alle Alternativen im Vergleich zu den übrigen Programmteilen viel Rechenzeit. Da es sich bei dem Modell ohnehin um ein stochastisches Verfahren handelt und da die Einschätzung der Reisezeiten durch den Verkehrsteilnehmer auch mit Fehlern behaftet ist, kann man auf den exakten Vergleich der Reisezeiten verzichten und die Orte in Zonen zusammenfassen. Das bedeutet nicht, daß wie im Zonen-basierten Modell letztendlich Fahrtenaufkommen zwischen Zonen betrachtet werden. Die Zonen sind lediglich ein Hilfsmittel in einem Zwischenschritt zur Festlegung der Ziele für die nach wie vor einzeln betrachteten Fahrten. Das Ergebnis der Verkehrsfluß-Simulation wird in einer Matrix von Parametern für die Reisezeiten von jeder Zone zu jeder Zone zusammengefaßt [23]. Die Parameter sind  $y$ -Achsenabschnitt und Steigung einer Regressionsgeraden, deren Argument die Luftli-

nienentfernung von Start- und Zielort ist. Es wird für jede Viertelstunde des Tages solch ein Parameterpaar zur Verfügung gestellt, das von der jeweiligen Verkehrsdichte und den möglichen Routen, welche die Zonen verbinden, abhängt. So wird also statt einer sortierten Liste der Ziele zunächst eine sortierte Liste von Zonen erzeugt und die Zonen werden entsprechend der Zahl der Ziele, die sie enthalten, gewichtet. Nach dem Modell der *intervening opportunities* wird die Zone bestimmt, in der das Ziel liegt. Dieses wird zufällig unter allen Zielen der Zone gewählt.

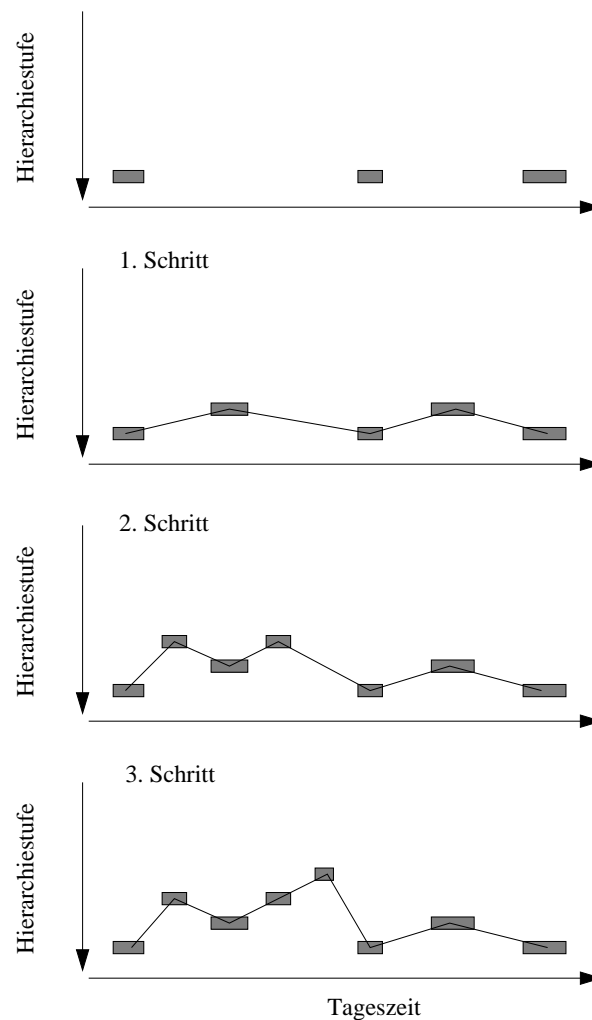


Abbildung 2.12: Sukzessive Verkehrsmittelwahl für die Hin- und Rückwege der verschiedenen Aufenthalte einer Tour.

### Auslastung der Ziele

Bei einigen Aktivitäten, wie zum Beispiel der Erwerbsarbeit, dem Schulbesuch oder dem Studium, sind besondere Randbedingungen bekannt, die in der Modellierung ausgenutzt werden können: Jeder Arbeitsplatz, Schul- oder Studienplatz wird von nur einer Person belegt. Außerdem ist der Arbeitsplatz — abgesehen von Dienstwegen während der Arbeit, die hier nicht berücksichtigt sind — für die meisten Personen immer der gleiche, so daß bei einem mehrfachen Auftreten dieser Aktivität im Tagesverlauf jedesmal der gleiche Ort aufgesucht wird. Um diese Sachverhalte in das oben beschriebene Verfahren zu integrieren, ist eine Buchführung notwendig. Ein einmal ausgewählter Arbeitsplatz steht anderen Personen nicht mehr zur Verfügung. Damit ist die Zielwahl des einzelnen nicht mehr unabhängig von der Zielwahl anderer Personen und strenggenommen muß das Problem unter Einbeziehung aller Personen gelöst werden. Die Zahl der möglichen Lösungen ist die Fakultät der Zahl der Arbeitsplätze, so daß eine Betrachtung aller Lösungen ausgeschlossen ist. Auch hier wird an einer sequentiellen Bearbeitung festgehalten. Wenn man die Kapazität der Arbeitsplätze linear mit jeder Neubelegung reduziert, dann besteht für die letzte Person, die ihren Arbeitsplatz wählt, keine Auswahl mehr. Sie muß genau den einen nehmen, der noch übrig ist. Zum einen kann nicht angenommen werden, daß die Zahl der Arbeitsplätze exakt bestimmt wird, zum andern ist nach einem Verfahren zu suchen, das die Unterschiede der Wahlsituation für die erste und die letzte Person minimiert. Das wird durch einen exponentiellen Ansatz erreicht, bei dem die für die Auswahl maßgebliche Restkapazität gegeben ist durch:

$$c = c_0 e^{-\alpha n / c_0}$$

$c_0$ : Ursprüngliche Kapazität

$\alpha$ : Parameter, der den Einfluß der Belegung steuert

$n$ : Belegung

Bei einer Auslastung entsprechend der ursprünglichen Kapazitäten ist so das Verhältnis der Restkapazitäten zu jedem Zeitpunkt gleich. Dadurch daß die Personen des Modells nahegelegene Arbeitsplätze bevorzugen, sind allerdings Überbelegungen möglich. Es ist wichtig, daß die Personen in zufälliger Reihenfolge die Arbeitsplätze wählen. Bei einer räumlichen Ordnung der Personen würden die längeren Anfahrten zum Arbeitsplatz wiederum vermehrt die Personen treffen, die zuletzt an die Reihe kommen.



## 2.7 Anpassung des Tagesplans an Reisezeiten

Die Klassifizierung der Tagesabläufe erscheint angesichts des ähnlichen Aufbaus der Tagesabläufe in den Klassen oder wegen Ähnlichkeiten im Budget gerechtfertigt. Die Abbildungen 2.8 und 2.9 Seite 77 lassen aber auch erkennen, daß es eine beachtliche Variabilität in den Anfangszeiten gibt. Das gilt auch für die Dauer von Episoden. Die Variabilität kommt zustande durch viele zufällige Einflüsse und ist oft auch Ausdruck der Freiheit der Menschen, ihre Zeiteinteilung persönlichen Bedürfnissen anzupassen. Würden in der Modellierung starre Zeitmuster verwendet, könnten unrealistische zeitliche Konzentrationen von Wegen Störungen im Verkehrsablauf entstehen lassen, die nicht der Realität entsprechen. Andererseits machen es die Variationen in den Tagesabläufen möglich, Tagespläne an die jeweils räumliche Situation der Personen im Untersuchungsgebiet anzupassen, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben. Man beachte, daß die hier betrachtete Variabilität nicht die zeitliche Flexibilität der Menschen in ihren Rhythmen abbildet oder ihre Möglichkeiten, einen Tagesplan spontan zu verändern. Es geht vielmehr darum, das Spektrum von Tagesplänen verschiedener Menschen zu beschreiben. Das läßt sich am Beispiel eines Arztbesuches erläutern. Wenn ein Termin bei einem Arzt verabredet ist, ist er innerhalb eines Tagesablaufes relativ starr. Betrachtet man aber die Arzttermine einer größeren Gruppe von Personen, werden die Termine über den ganzen Tag verteilt sein. Wenn diese Streuung in der Modellierung verwendet wird, bedeutet das in etwa: Personen legen sich ihre Arzttermine so, daß sie sich in ihren restlichen Tagesablauf integrieren lassen.

Die Variabilität wird eingeschränkt durch Rhythmen, kulturelle Konventionen und gesellschaftliche Regelungen. Im Prinzip wäre es wünschenswert, letztere, wie zum Beispiel bestimmte Arbeitszeitregelungen bei großen Arbeitgebern, explizit in das Modell aufzunehmen. Das ist aber nur aufgrund entsprechender Erhebungen im Untersuchungsgebiet möglich, die hier nicht vorliegen. Neben den äußeren Einflüssen auf die Zeitverwendung gibt es auch einen inneren Zusammenhang unter den verschiedenen Episoden, der sich ebenfalls auf die Variabilität auswirkt. Ein Tagesplan, der zum großen Teil von zeitlich stark festgelegten Pflichtaktivitäten ausgefüllt ist, läßt für die restlichen Aktivitäten weniger Spielraum als ein Tagesplan ohne Pflichtaktivitäten. Zur Berechnung der Variabilität von Zeitverwendungsmustern wird daher auf die Klassifizierung der Tagebücher Bezug genommen. Alle Episoden eines Tagebuchs werden mit den Episoden des gleichen Aktivitätentyps der Tagebücher in der gleichen Tagebuchklasse verglichen. Es wird bestimmt, wie weit der Startzeitpunkt zu früheren oder späteren Zeiten verschoben

sein kann und wie sehr die Dauer verlängert oder verkürzt werden kann. Für die Verschiebung des Startzeitpunkts zu früheren Zeiten wird zum Beispiel der Mittelwert der Startzeitpunkte aller Episoden gebildet, die früher beginnen. Da aber nicht davon ausgegangen werden kann, daß alle diese Episoden eine vergleichbare Funktion im Tagesablauf haben, werden sie mit einem Filter gewichtet. Das Gewicht ist eins für eine Episode mit gleicher Dauer und gleichem Startzeitpunkt wie die Bezugsepisode und wird kleiner je größer die Abweichungen in diesen Größen sind:

$$w(\Delta t_s, x_d) = x_d^\beta e^{(1-x_d)\beta} \cdot \frac{1}{(1 + \alpha \Delta t_s)^\nu},$$

$\Delta t_s$ : Betrag der Differenz der Startzeitpunkte,

$x_d$ : Quotient der Dauer der Episoden  $d/d_0$ ,

$d_0$ : Dauer der Bezugsepisode,

$\beta$ : 4.0,

$\nu$ : 4.0,

$\Delta t_s^{(1/2)}$ : 30 min,

$\alpha$ :  $1/\Delta t_s^{(1/2)}$ .

In einem Zeitverwendungsmuster ist also die Anfangszeit einer Episode durch drei Werte beschrieben. Der erste Wert ist der gewichtete Mittelwert der Anfangszeiten aller Episoden, die früher beginnen, der zweite Wert die Anfangszeit in dem Tagebuch, das die Episode enthält, der dritte Wert ist der gewichtete Mittelwert der Anfangszeiten aller Episoden, die später beginnen. Analog gilt dies für die Dauer der Episoden. Je größer die Intervalle links ( $\delta_s^-$ ) und rechts ( $\delta_s^+$ ) von dem ursprünglich berichteten Wert, desto langsamer steigen die Strafterme, wenn wegen veränderter Reisezeiten die Parameter der Episode angepaßt werden müssen.

Wenn die Strafterme quadratisch mit den Abweichungen im Startzeitpunkt und in der Dauer steigen und wenn man die Summe der Strafterme für einen Tag minimiert, lassen sich die neuen Anfangszeiten leicht berechnen. Es seien  $u_i(x_i)$  die Kosten für einen neuen Startzeitpunkt  $x_i$  der  $i$ -ten Episode und  $w_i(x_{i+1} - x_i)$  die Kosten für die Dauer  $x_{i+1} - x_i$  der Episode. Mit dem quadratischen Ansatz  $u_i(x_i) = \alpha_i(x_i - s_i)^2$  und

$w_i(x_{i+1} - x_i) = \beta_i(x_{i+1} - x_i - d_i)^2$  erhält man für die Gesamtkosten:

$$\begin{aligned}
 U(x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}) &= \\
 &u_1(x_1) + w_1(x_2 - x_1) + u_2(x_2) + w_2(x_3 - x_2) \\
 &\quad + \dots + u_n(x_n) + w_n(x_{n+1} - x_n) + u_{n+1}(x_{n+1}) \\
 &= \alpha_1(x_1 - s_1)^2 + \beta_1(x_2 - x_1 - d_1)^2 + \alpha_2(x_2 - s_2)^2 + \beta_2(x_3 - x_2 - d_2)^2 \\
 &\quad + \dots + \alpha_n(x_n - s_n)^2 + \beta_n(x_{n+1} - x_n - d_n)^2 + \alpha_{n+1}(x_{n+1} - s_{n+1})^2,
 \end{aligned}$$

$s_i$ : ursprünglicher Startzeitpunkt der Episode  $i$ ,

$d_i$ : ursprüngliche Dauer der Episode  $i$ ;

$\alpha$ :  $1/\delta_S^2$ ,

$\beta$ :  $1/\delta_D^2$ ,

Die Episode  $n + 1$  wird an die Episoden des Tagesprogramms angefügt, ihr Startzeitpunkt wird benötigt, um die Dauer der letzten echten Episode miteinzubeziehen.  $\alpha$  und  $\beta$  sind Parameter, die in dem oben beschriebenen Verfahren aus den Startzeitpunkten der Episoden berechnet werden. Da früher beginnende Episoden und später beginnende Episoden getrennt betrachtet werden, gibt es auch zwei Werte für die Differenzen  $\delta_S$  und  $\delta_D$  aus den Mittelwerten der Anfangszeit der betrachteten Episode und folglich auch für  $\alpha$  und  $\beta$ . Welcher dieser Werte jeweils eingesetzt werden muß, hängt von der Lösung  $\mathbf{x}$  für die Startzeitpunkte ab. Zunächst wird eine Lösung berechnet, für die angenommen wird, daß die Differenzen in Startzeitpunkten und in der Dauer alle positiv sind. Ist dies in der Lösung nicht der Fall, werden die Parameter entsprechend gesetzt, und die Lösung wird erneut berechnet. Im Punkt  $\mathbf{x}$ , wo  $U$  ein Minimum annimmt, verschwinden die partiellen Ableitungen:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial U}{\partial x_1} &= 0 \Rightarrow \\
 &(\alpha_1 + \beta_1)x_1 - \beta_1x_2 = \alpha_1s_1 - \beta_1d_1 \\
 \frac{\partial U}{\partial x_i} &= 0 \Rightarrow \\
 &-\beta_{i-1}x_{i-1} + (\beta_{i-1} + \alpha_i + \beta_i)x_i - \beta_ix_{i+1} = \beta_{i-1}d_{i-1} + \alpha_is_i - \beta_id_i \\
 \frac{\partial U}{\partial x_{n+1}} &= 0 \Rightarrow \\
 &-\beta_nx_n + (\beta_n + \alpha_{n+1} + \beta_{n+1})x_{n+1} = \beta_nd_n + \alpha_{n+1}s_{n+1}
 \end{aligned}$$

Das führt auf ein lineares Gleichungssystem  $A\mathbf{x} = \mathbf{b}$  mit tridiagonaler Koeffizientenmatrix, das sich durch  $LU$ -Zerlegung effizient lösen läßt [60].

$$A = \begin{pmatrix} \alpha_1 + \beta_1 & -\beta_1 & 0 & \cdots & 0 \\ -\beta_1 & \beta_1 + \alpha_2 + \beta_2 & -\beta_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -\beta_2 & \beta_2 + \alpha_3 + \beta_3 & -\beta_3 & & 0 \\ \vdots & & & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & & 0 & \beta_n & \beta_n + \alpha_{n+1} \end{pmatrix}$$

und

$$\mathbf{b} = \begin{pmatrix} \alpha_1 s_1 - \beta_1 d_1 \\ \beta_1 d_1 + \alpha_2 s_2 - \beta_2 d_2 \\ \vdots \\ \beta_n d_n + \alpha_{n+1} s_{n+1} \end{pmatrix}$$

Das Ausgleichsverfahren ist in seiner Richtung nicht festgelegt. Wenn die Reisezeiten für den letzten Weg des Tages von der ursprünglichen Eintragung abweichen, dann kann das eine Verschiebung in den frühen Morgenstunden zur Folge haben. Das entspricht in der Realität der Erfahrung der Menschen mit ihrem Wohnumfeld und ihrer Zeitverwendung. Aktivitäten am Abend können dazu führen, daß die restliche Planung angepaßt werden muß. Für Tagespläne, bei denen der Ausgleich nicht erfolgreich ist, zum Beispiel weil Episoden ganz ausfallen müßten oder weil  $U$  einen bestimmten Schwellenwert überschreitet, werden neue Ziele gesucht und die Verkehrsmittel werden neu festgelegt, bis eine akzeptable Lösung gefunden oder ein Maximalwert für die Zahl der Versuche überschritten ist. Im zweiten Fall beginnt der Prozeß mit einem neuen Schema von vorn. Der Schwellenwert für  $U$  und die Funktion für die Ablehnungswahrscheinlichkeit ist durch eine Erhebung zu bestimmen, indem man Versuchspersonen Verschiebungen in ihren gewohnten Tagesabläufen bewerten läßt. Da dies im Rahmen der Arbeit nicht möglich ist, werden die Schwellenwerte in Bezug auf eine generelle Verlängerung der Reisezeiten bestimmt. Bei unveränderten Reisezeiten werden zum Beispiel 99.5% aller Pläne akzeptiert. Wenn sich alle Reisezeiten auf das Anderthalbfache verlängern, sinkt der Anteil auf 50%.

## 2.8 Verkehrsfluß-Simulation

Die Attraktivität von Alternativen bei der Ziel- und Routenwahl hängt für jeden Verkehrsteilnehmer vom Verhalten vieler anderer Verkehrsteilnehmer ab. Die Personen des

Untersuchungsgebietes müssen sich begrenzte Ressourcen, wie die Zahl der Arbeitsplätze und die Kapazitäten des Verkehrsnetzes teilen. Die begrenzte Kapazität des Verkehrsnetzes teilt sich den einzelnen Reisenden durch eine Erhöhung der Reisezeit mit, sobald die Nachfrage die Kapazitätsgrenze erreicht. Im vorliegenden Modell wird lediglich die Veränderung der Reisezeiten im Straßennetz betrachtet. Für Wege zu Fuß und mit dem Fahrrad wird jeweils eine konstante Geschwindigkeit von  $1.3 \text{ m/s} = 4.7 \text{ km/h}$ , bzw.  $4.0 \text{ m/s} = 14.4 \text{ km/h}$  angenommen. Die Reisezeiten der Fahrten mit dem ÖPNV hängen wie die Reisezeiten der Pkw-Fahrten von Start- und Zielort und von der Abfahrtszeit, nicht jedoch von der Auslastung der ÖPNV-Netzes ab. Es wird also angenommen, daß der ÖPNV-Anbieter den Fahrplan einhalten kann.

Die Bestimmung der Reisezeiten im Straßennetz besteht aus zwei eng aufeinander bezogenen Teilaufgaben: Nachdem die Simulation der Verkehrsnachfrage Start, Ziel und Abfahrtszeit festlegt, ist die Route zu bestimmen, auf der die Strecke zwischen Start und Ziel zurückgelegt wird. Erst bei bekannten Routen lassen sich die Reisezeiten schätzen, wobei die Routen ihrerseits wieder von den Reisezeiten abhängen. Um eine vergleichbare Situation zu definieren, wird angenommen, daß die Fahrer bestrebt sind, unter den jeweils gegebenen Bedingungen die für sie schnellste Route zu finden. Der gesuchte Zustand wird als Nutzergleichgewicht bezeichnet: Keiner der Fahrer kann durch einen Wechsel der Route eine kürzere Reisezeit erzielen (sogenanntes erstes Wardropsches Prinzip [76]). Wenn sich die Reisezeiten in Abhängigkeit von der Belastung im Laufe des Tages verändern, spricht man von einem dynamischen Nutzergleichgewicht. Es können prinzipiell auch weitere Kriterien, z.B. die Länge der Route miteinbezogen werden. In dem hier verwendeten Modell [31] verfügt jeder Fahrer über eine Menge von Routen, von der jede mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit gewählt wird. In einem iterativen Verfahren werden in jedem Durchlauf die Auswahlwahrscheinlichkeiten angepaßt und die Reisezeiten berechnet, die sich für die aktuelle Routenauswahl der Fahrer ergibt. Die Reisezeiten  $\tau_d$ , aufgrund derer der Fahrer seine Wahl trifft, werden fortgeschrieben nach:

$$\tau'_d(r) = \tau_s(r) \quad (2.1)$$

$$\tau'_d(s) = \beta \tau_g(s) + (1 - \beta) \tau_d(s) \quad \forall s \in R \setminus r. \quad (2.2)$$

$r$  ist die Route des Fahrers für den aktuellen Durchlauf.  $s$  ist eine der übrigen Routen in der Auswahlmenge  $R$ .  $\tau_s(r)$  ist die Reisezeit aus dem aktuellen Durchlauf, und  $\tau_g(s)$  berechnet sich aus den dynamischen Reisezeiten auf den Kanten des Netzes. Der zweite Term in 2.2 entspricht einem Gedächtnis: Die Reisezeiten aus früheren Simulationen tragen zum aktuell betrachteten Wert bei. Der Parameter  $\beta$  ist für die hier verwendeten

Simulationen auf 0.05 gesetzt.

Die Auswahlwahrscheinlichkeit für die aktuelle Route  $r$  verändert sich aufgrund der relativen Reisezeitdifferenzen

$$\delta_{rs} = \frac{\tau_d(s) - \tau_d(r)}{\tau_d(s) + \tau_d(r)}.$$

Und zwar ist:

$$p'_d(r) = f(\delta_{rs}) \quad (2.3)$$

$$p'_d(s) = p_d(s) - (p'_d(r) - p_d(r)) \quad (2.4)$$

mit einer monotonen, differenzierbaren Funktion  $f$ , zum Beispiel:

$$f(x) = \frac{p_d(r) (p_d(r) + p_d(s)) g(x)}{p_d(r)g(x) + p_d(s)}$$

mit:

$$g(x) = \exp\left(\frac{ax}{1-x^2}\right)$$

Der Parameter  $a$  bestimmt, wie empfindlich die Fahrer auf Reisezeitdifferenzen reagieren.

Da für die Festlegung der Routen der Verkehrssituation mehrmals simuliert werden muß, ist es wünschenswert, ein schnelles Verfahren einsetzen zu können. Die Dynamik in einem Straßennetz hat besondere Eigenschaften: Die Reisezeit auf einer Kante hängt nicht nur von der Zahl der Fahrzeuge ab, die sich auf der Kante befinden, sondern auch davon, ob die Fahrzeuge in die folgenden Kanten abfließen können. Ist dies nicht der Fall, stauen sich die Fahrzeuge im Netz, und ein Engpaß kann sich in Netzbereichen auswirken, die weit von der Stelle des Engpasses entfernt sind. Es sind verschiedene Vorschläge gemacht worden, die Wechselwirkung zwischen Fahrzeugen in physikalisch-mathematischen Modellen zu beschreiben. Anhand der Modelle läßt sich der Übergang zwischen verschiedenen Verkehrszuständen im Vergleich zu Phasenübergängen diskutieren [64]. Mikroskopische — also auf Einzelfahrzeuge bezogene — Modelle bilden die wechselseitige Abhängigkeit von Fahrzeugpositionen und -geschwindigkeiten durch Fahrzeugfolgeregeln ab, während makroskopische Modelle mit Gleichungen für die Zustandsgrößen Fluß, Dichte und Geschwindigkeit arbeiten. Für das oben vorgestellte Verfahren zur Bestimmung des Nutzergleichgewichts wird ein Warteschlangenmodell als ein sogenanntes mesoskopisches Verfahren vorgeschlagen: Die Reisezeit auf einer Kante setzt sich zusammen aus der Zeit, um vom Anfang der Kante an deren Ende zu gelangen

und aus einer Wartezeit. Die Wartezeit wird ihrerseits bestimmt durch die Rate, mit der Fahrzeuge den nächsten Knoten passieren können, und dadurch, daß möglicherweise die folgende Kante keine Fahrzeuge aufnehmen kann, da sich auf ihr die Fahrzeuge stauen. So wird erreicht, daß sich Staus entgegen der Fahrtrichtung fortpflanzen. Allerdings wird die Dynamik von Staus, nämlich die Bewegung der *Staufront* entgegen der Fahrtrichtung nicht richtig erfaßt [22]. Das Modell wurde im Rahmen einer Dissertation am Zentrum für angewandte Informatik an der Universität zu Köln implementiert [30]. Das Programm trägt den Namen FASTLANE.

Die Reisezeiten für den ÖPNV beruhen auf den Linienverläufen der Busse und Straßenbahnen im Untersuchungsgebiet und den Taktzeiten. Daraus werden mittlere Reisezeitenpaare für alle Haltestellen bestimmt. Die entsprechende Matrix für das hier untersuchte Gebiet wurde im Projekt SimVV erstellt [23].

Für die Zielwahl müssen für alle potentiellen Ziele Reisezeiten ermittelt werden. Die exakte Berechnung anhand der dynamischen Reisezeiten auf den Kanten wäre wegen der großen Zahl der zu betrachtenden Orte sehr aufwendig. Die Zielwahl enthält ohnehin eine stochastische Komponente. Daher sind Näherungen hier möglich: Die Reisezeiten werden für jede Stunde und für jedes Paar von Verkehrszellen im voraus berechnet. Grundlage hierfür sind die zeitabhängigen Reisezeiten für jede Kante aufgrund der Simulation mit dem Warteschlangenmodell. Es werden zufällig zwanzig Knoten in jeder der beteiligten Zellen ausgewählt. Für alle Knotenpaare wird mithilfe eines Dijkstra-Algorithmus' die Reisezeit bestimmt und aus diesen Werten werden die Parameter einer linearen Regressionsgeraden bezogen auf die Luftlinienentfernung schätzt. Bei der Abfrage läßt sich die Luftlinienentfernung leicht ermitteln und mit den Parametern der Regressionsgeraden ein Näherungswert für die Reisezeit berechnen.





# Kapitel 3

## Anwendungsbeispiel Köln

Der Untersuchungsraum für das Anwendungsbeispiel ist das Gebiet der Stadt Köln. Wegen ihrer Größe und des damit verbundenen Verkehrsaufkommens ist die Stadt ein realistischer Anwendungsfall für das Modell. Die Bevölkerungsdichte ist durch die Aufnahme ehemals selbständiger Gemeinden nicht homogen, und durch die Lage beiderseits des Rheins ergibt sich eine besondere Topologie des Verkehrsnetzes, in dem die Brücken natürliche Engpässe sind. Darüber hinaus gibt es praktische Gründe, das Modell auf Köln anzuwenden, da in vorangegangenen Untersuchungen schon Daten zusammengetragen und aufbereitet wurden, die hier wieder Verwendung finden: Daten zur Bevölkerungsstruktur, die Lage und Kapazität von Orten, wo verschiedene Aktivitäten ausgeübt werden, das Straßennetz und das Netz des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV). Außerdem steht durch das Projekt STADTINFOKÖLN eine Start-Ziel-Matrix für einen Vergleich zur Verfügung (siehe Abschnitt 3.3). Sie ist mit einem zonenbezogenen Verfahren erstellt worden und enthält für jede Stunde des Tages die Zahl der MIV-Wege für jedes Paar von Start- und Zielzone.

Die Nachfrage der Simulation wird für einen Werktag generiert. Die verwendeten Zeitverwendungsmuster stammen aus Zeitverwendungstagebüchern für die Tage Dienstag, Mittwoch und Donnerstag (siehe Abschnitt 2.3.4). Dadurch daß sich drei Werktage zusammenfassen lassen, ergibt sich eine größere Datenbasis. Die Verkehrsnachfrage hängt über die Ziel- und Verkehrsmittelwahl von den Reisezeiten ab, die sich ihrerseits wiederum aus der Belastung des Netzes, also der Nachfrage ergeben. Ausgehend von den Reisezeiten im unbelasteten Netz werden Nachfrage-Simulation und Verkehrsumlegung iteriert. Nach drei Iterationen schwankt die Zahl der MIV-Fahrten und die Gesamtfahrleistung nur noch um etwa ein Prozent (Vgl. auch [47]).

Merkmal	Ausprägungen	Raumbezug	Quelle, Erhebungszeitpunkt
Alter und Geschlecht	männlich, weiblich; bis 6, 10, 18, 40, 65, über 65 Jahre	Verkehrszelle	Stadt Köln, 1998
Größenverteilung der Haushalte	Zahl der Haushaltsmitglieder	Verkehrszelle	Stadt Köln, 1998
Berufliche Tätigkeit	Selbständige, Angestellte, Beamte, Richter, Soldaten, Auszubildende	Stadtteil	Landesamt für Datenverarbeitung und Statistik NRW, Volkszählung 1987
Schulabschluß	Volks-/Hauptschule, Realschule, Hochschul-/ Fachhochschulreife, Berufsschule/ Fachschule, Hochschul-/ Fachhochschulabschluß	Stadtteil	Landesamt für Datenverarbeitung und Statistik NRW, Volkszählung 1987
Zahl der Kfz		Verkehrszelle	Stadt Köln, 1998

Tabelle 3.1: *Verfügbare Daten aus dem Untersuchungsgebiet*

### 3.1 Datengrundlagen

Die Übersicht über die im Anwendungsfall verwendeten Daten macht die Voraussetzungen für die Anwendung des Modells in Bezug auf Umfang und Qualität der Daten deutlich. Die Datengrundlage für die Zeitverwendung ist in Abschnitt 2.3.1 beschrieben, da sie nicht spezifisch für den Untersuchungsraum erhoben wurde. Die für die Erzeugung der synthetischen Bevölkerung verwendeten Methoden sind in Abschnitt 2.2 erläutert.

#### 3.1.1 Bevölkerungsdaten

Die Bevölkerungsdaten sind von grundlegender Bedeutung für die Schätzung der Verkehrsnachfrage. Alle Modellierungsschritte sind an die Zahl der Einwohner und an ihre Eigenschaften gekoppelt. Sie bestimmen, welche Zeitverwendung angenommen wird, sie haben Einfluß auf die Ziel- und Verkehrsmittelwahl. Tabelle 3.1 zeigt, welche Daten für welchen Bezugsraum zur Verfügung stehen. Verkehrszellen sind dabei die kleinste

räumliche Einteilung, von ihnen gibt es im Stadtgebiet 691. Die nächst größere Einheit sind 85 Stadtteile, die wiederum zu neun Bezirken zusammengefaßt sind. Die Variablen *Geschlecht* und *Alter* liegen gemeinsam für Verkehrszellen vor. Ebenso ist die Größenverteilung von Haushalten auf der Ebene der Verkehrszellen verfügbar. Die Daten zum *Schulabschluß* und zur *Beruflichen Tätigkeit* sind stärker aggregiert: sie beziehen sich auf Stadtteile. Die *Zahl der Pkw* liegt nur als Summe für jede Verkehrszelle vor.

Das Problem des unterschiedlichen Bezugsraumes von Basisdaten (*Alter* und *Geschlecht*) und den Angaben zu *Schulabschluß* und *Beruflicher Tätigkeit* wird dadurch gelöst, daß im Verfahren des *iterative proportional fitting* die Verkehrszelle als weitere Variable eingeführt wird. Die synthetische Bevölkerung wird dann für jeden Stadtteil erzeugt. Eine Besonderheit ergibt sich für die Variable *Berufliche Tätigkeit*, da hier diejenigen Personen, die nicht berufstätig sind, nicht weiter unterschieden werden. Die Ausprägungen *Schüler/-in*, *Hausfrau/-mann*, *Rentner/-in* und *Arbeitssuchende/-r* werden aufgrund der Basisdaten durch einen Vergleich mit der Stichprobe der Zeitbudgeterhebung (siehe Abschnitt 2.3 und [21]) vergeben. Für die Haushalte ist zwar die Größenverteilung bekannt, es gibt aber keinen Bezug zu den Basisdaten der Personen. Um dennoch eine plausible Zusammensetzung der Haushalte zu erhalten, werden die strukturellen Merkmale anhand der Haushalte in der Zeitbudgeterhebung übertragen. Dazu werden die Personen aufgrund von *Alter*, *Geschlecht* und *Berufstätigkeit* unterschieden. Es wird pro Haushalt eine Bezugsperson festgelegt und anhand der Daten der Zeitbudgeterhebung wird die Wahrscheinlichkeit dafür bestimmt, daß die Bezugsperson zu einer der Personenkategorien gehört. Die übrigen Haushaltspositionen werden in Abhängigkeit von den Merkmalen der Bezugsperson besetzt. Analog zu den fehlenden Ausprägungen von Nicht-Berufstätigen muß für die Haushalte die Variable *Einkommen* aus der Stichprobe der Zeitbudgeterhebung übertragen werden. Die Zahl und der Status der berufstätigen Personen in einem Haushalt wird für die Zuordnung der Einkommen der Haushalte der Stichprobe zu den Haushalten der synthetischen Bevölkerung herangezogen [36].

Für die Schätzung der *Zahl der Pkw* in den einzelnen Haushalten wird auf die Eigenschaften der Haushalte und die Gesamtzahl der Pkw in den Verkehrszellen zurückgegriffen. Zunächst werden über einen CHAID-Baum basierend auf den Daten von *Mobilität in Deutschland 2002* [13] die Häufigkeitsverteilungen für die Anzahl der Pkw im Haushalt aufgrund der Größe des Haushalts und des Haushaltseinkommens bestimmt. Entsprechend dieser Verteilungen wird jedem Haushalt vorläufig eine Anzahl von Pkw zugewiesen. Für jede Zone wird anschließend festgestellt, ob die Zahl der Pkw in den Haushalten von der Gesamtzahl abweicht. Entsprechend der Differenz wird die Zahl der

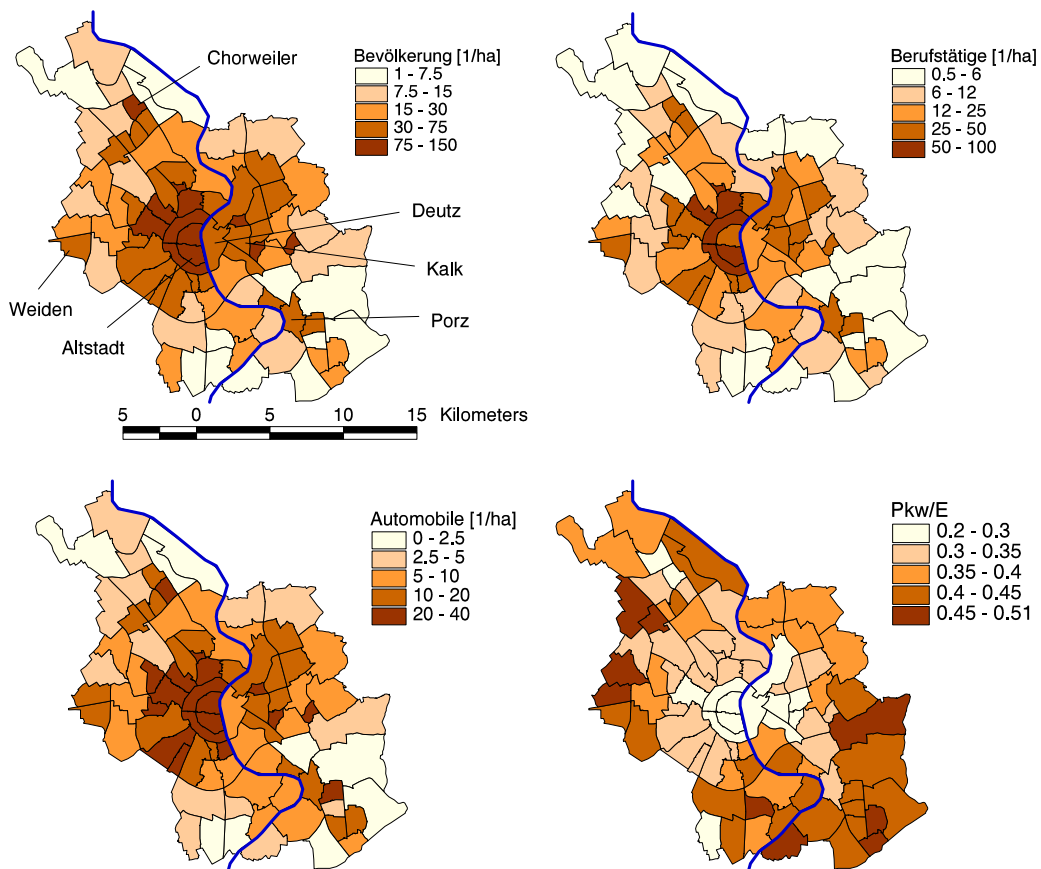


Abbildung 3.1: Dichte der Bevölkerung und der Erwerbstätigen, Dichte an Pkw und Pkw pro Einwohner.

Pkw in den Haushalten erhöht oder vermindert.

Das Stadtgebiet von Köln ist in den letzten beiden Jahrhunderten stark gewachsen, wodurch sich eine besondere Struktur der Bevölkerungsdichte ergibt. Die mittelalterliche Altstadt auf der linken Rheinseite ist deutlich als Zentrum erkennbar. Ende des 19. Jahrhunderts entwickelten sich die direkt an das Zentrum angrenzenden Stadtteile, und Deutz auf der rechten Rheinseite wurde ein Teil von Köln. In Kalk — ebenfalls auf der rechten Rheinseite — siedelten sich Ende des 19. Jahrhunderts Industrieunternehmen an. Die älteren Orte Porz im Süden und Weiden im Westen kamen durch die Gebietsreform 1975 zu Köln. Chorweiler im Norden wurde erst 1960 um eine Hochhaussiedlung erweitert. Die Siedlung erklärt die hohe Bevölkerungsdichte des Stadtteils [71]. Die Verteilung der Berufstätigen folgt ebenso wie die Dichte der Pkw der Bevölkerungsverteilung, obwohl

die Zahl der Pkw pro Einwohner stark schwankt und im allgemeinen gegenläufig ist zur Bevölkerungsdichte (Abbildung 3.1).

### 3.1.2 Standorte

Der aktivitätenbasierte Ansatz beschreibt Wege als die Folge der Teilnahme an Aktivitäten außer Haus. Für die Simulation der Nachfrage ist daher entscheidend, wo diese Aktivitäten stattfinden können. Die möglichen Ziele für Wege eines bestimmten Zwecks müssen bekannt sein. Für das vorliegende Anwendungsbeispiel werden Daten aus dem Projekt SIMVV [6] verwendet, die vom Institut für Stadt- und Verkehrswesen der RWTH Aachen aufbereitet wurden. Grundlage hierfür ist der Flächennutzungsplan der Stadt Köln, ein Branchenverzeichnis und die Arbeitsstättenzählung aus dem Jahre 1987, deren Werte auf das Jahr 1999 hochgerechnet wurden. Bei einer kleinen Zahl möglicher Ziele für eine Aktivität und einer großen Zahl von Nutzern wurden die Standorte einzeln erhoben. Andernfalls wurde die Zahl der Aktivitäten bezogen auf Rasterpunkte innerhalb eines Stadtteils bestimmt und dann wiederum Knoten des Verkehrsnetzes zugewiesen. 30 verschiedene Typen von Aktivitäten wurden für die Ziele unterschieden. Der Projektbericht beschreibt das Vorgehen für jeden Typ im Detail [62].

Im Vergleich zur Bevölkerungsdichte (Abbildung 3.1) sind die Gelegenheiten in Abbildung 3.2 noch stärker auf das Stadtzentrum konzentriert. Das gilt besonders für die Arbeitsplätze und Einkaufsgelegenheiten. Für die Schulen spielen auch die Bevölkerungsschwerpunkte außerhalb des Zentrums eine Rolle. Bei den Gelegenheiten für die übrigen Aktivitäten sind die Ungleichgewichte am wenigsten stark ausgeprägt.

### 3.1.3 Verkehrsnetze

Sowohl das Straßennetz als auch das ÖV-Netz werden aus dem Projekt SIMVV übernommen. Im Abschlußbericht wird zu dem Straßennetz festgestellt:

Zur Parametrisierung der Straßenabschnitte für FASTLANE [siehe auch Abschnitt 2.8] waren die folgenden Daten vorhanden:

- Anzahl der Fahrspuren,
- maximal erlaubte Geschwindigkeit und
- Straßentypisierung anhand von DTV-Werten.

Aus diesen lassen sich alle für FASTLANE benötigten Parameter ableiten, lediglich die Festlegung des maximalen Flusses erfordert einigen Kalibrie-

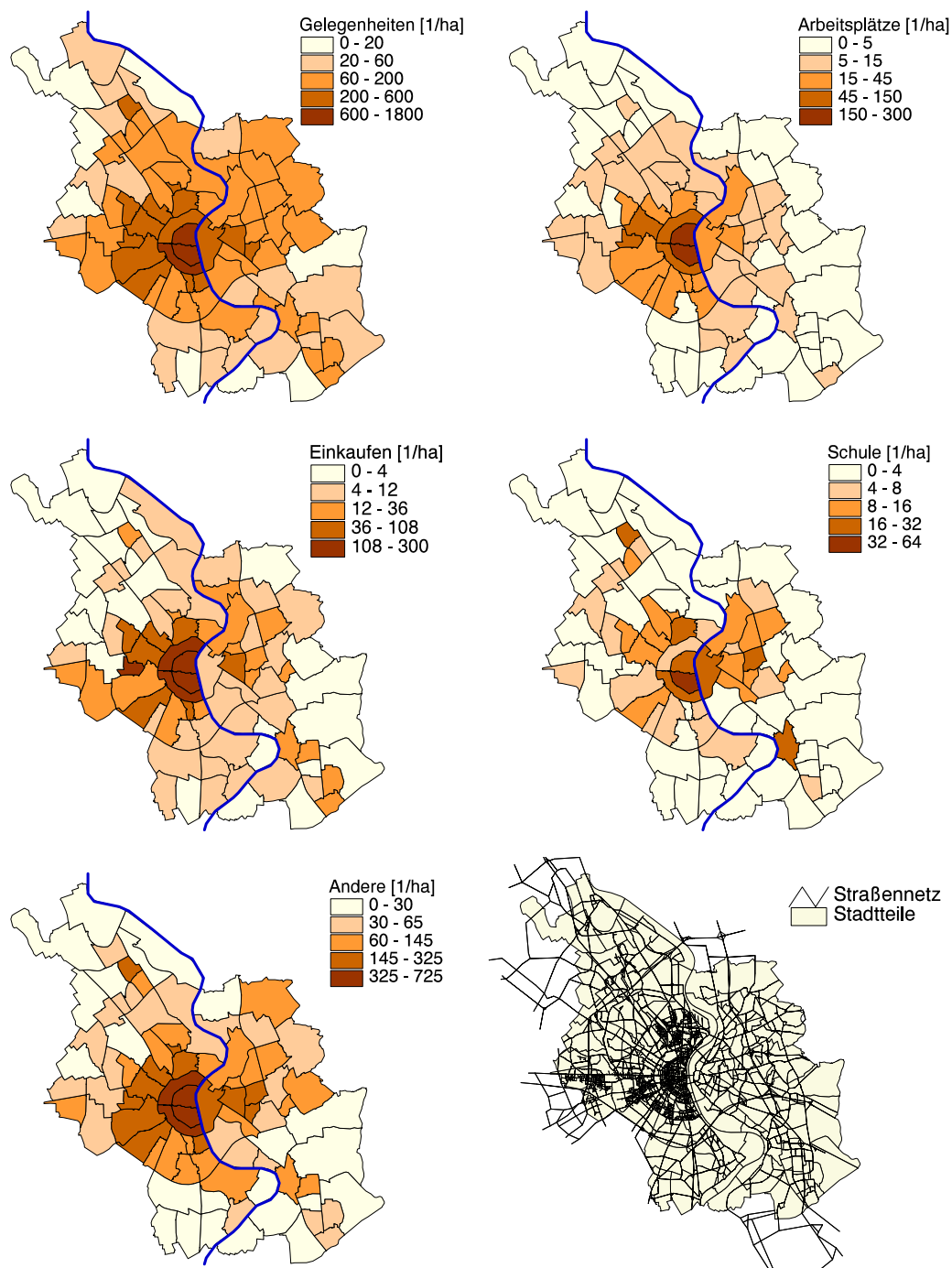


Abbildung 3.2: Dichte der Gelegenheiten (Orte für Aktivitäten) in den Stadtteilen für verschiedene Aktivitäten. Rechts unten: das Straßennetz

rungsaufwand. [...] Da für die Knoten keine Information über die Verkehrssteuerungsanlagen vorhanden sind, werden diese gemittelt über die Flußkapazität berücksichtigt. Dies entspricht auch dem Modellansatz von FAST-LANE. [23, S. 18]

Das Netz enthält keine reinen Wohnstraßen, da diese für den Verkehrsfluß von untergeordneter Bedeutung sind. So läßt sich der Aufwand für die Routensuche deutlich verringern. Das Netz besteht aus 6400 Knoten und 14240 Kanten (siehe Abbildung 3.2).

Das ÖV-Netz umfaßt 750 Haltestellen, die über die Linienverläufe verbunden sind. Für jede Linie, die zwei Haltestellen verbindet, wird eine eigene Kante eingefügt. Die Reisezeiten werden aus dem Fahrplan übernommen, ebenso der Takt. Es wird angenommen, daß sich der Takt jeweils innerhalb einer Stunde nicht ändert. Zusammen mit dem Zeitpunkt der jeweils ersten Abfahrt einer Linie von ihrer Starthaltestelle läßt sich ein Graph aufbauen, auf dem kürzeste Wege durch das ÖV-Netz gesucht werden können. Die Wartezeiten werden dadurch abgebildet, daß jede Haltestelle einer Linie mit einem Hilfsknoten versehen wird. Zwei zusätzliche Kanten im Graphen für den Ein- beziehungsweise Ausstieg verbinden diesen Hilfsknoten mit der eigentlichen Haltestelle. Die Kante für den Einstieg enthält die Wartezeit bis zur nächsten Abfahrt der Linie. Die Kante für den Ausstieg enthält die Zeit für Fußwege zwischen den Bahnsteigen einer Haltestelle, wenn an der Haltestelle umgestiegen wird, andernfalls ist die Reisezeit auf dieser Kante gleich Null [23]. Für die hier betrachteten Simulationen sind die Reisezeiten in einer Matrix abgelegt. Die räumliche Auflösung sind die 85 Stadtteile, die zeitliche Auflösung beträgt eine Stunde.

## **3.2 Parameter und Modellvarianten**

Das Basisszenario entspricht einem typischen Werktag unter normalen Bedingungen ohne Einschränkungen bei der Benutzung des Straßennetzes. Auf die Ergebnisse des Modells wird unter dem Namen TAPAS (**T**ransport-**A**ctivity-**P**attern **S**imulation) Bezug genommen.

### **3.2.1 Bestimmung der Parameter für die Ortswahl**

Wie in Abschnitt 2.6 beschrieben, versuchen die Personen einerseits, die Reisezeiten zu minimieren, indem sie die Ziele für Wege geordnet nach Reisezeiten in Betracht ziehen;

andererseits wird jedes einzelne Ziel mit der Wahrscheinlichkeit  $q$  abgelehnt oder übergangen. Die Wahrscheinlichkeit für die Auswahl des Zieles  $i$  ist dann:

Zweck	Alter	Geschlecht	$\bar{l}_{\text{MiD}}$	$\bar{l}_{\text{TAPAS}}$	$r$
Einkaufen	< 25	m	4.0	4.1	0.75
		w	3.7	3.8	0.56
	< 55	m	4.4	4.5	0.87
		w	3.7	3.7	0.41
	< 120	m	3.8	3.9	0.37
		w	3.1	3.1	0.19
Arbeiten	< 25	m	9.0	5.5	1.0
		w	7.8	5.4	1.0
	< 55	m	9.0	5.8	1.0
		w	7.4	5.6	1.0
	< 120	m	8.5	5.9	1.0
		w	5.8	5.7	1.0

Tabelle 3.2: Zielwahlparameter  $r$  für Wegekategorien der Wegezwecke Einkaufen und Arbeiten. Die Spalten  $\bar{l}_{\text{MiD}}$  und  $\bar{l}_{\text{TAPAS}}$  enthalten die mittleren Weglängen aus MiD und der Simulation.

$$f(i; q) = q^{(i-1)}(1 - q),$$

und die Wahrscheinlichkeit dafür, unter den ersten  $k$  Alternativen ein Ziel zu finden ist:

$$F(k; q) = P(i \leq k; q) = \sum_{i=1}^k f(i; q) = \sum_{i=1}^k q^{(i-1)}(1 - q) = 1 - q^k.$$

Für die Kalibrierung wird  $q$  bezogen auf den Wert  $q_{99}$  für den gilt  $k = 0.99 \cdot N$ , wenn  $N$  die Gesamtzahl aller Alternativen ist. Der Quotient  $r = q/q_{99}$  nimmt dann Werte zwischen 0 und 1 an, wenn man akzeptiert, daß ein Prozent der entferntesten Ziele nicht mehr berücksichtigt wird.

Die Ablehnungswahrscheinlichkeit  $q$  ist für verschiedene Ziele unterschiedlich, hängt aber auch von Eigenschaften der Person ab. Die Kreuztabellierung von Entfernungskategorien mit verschiedenen soziodemographischen Variablen für die Wege der Erhebung *Mobilität in Deutschland 2002* [13] zeigt, daß der Fahrtzweck den größten Einfluß hat (Goodman-Kruskal-Tau  $\tau = 0.019$ ). Der Wert verbessert sich durch die Kombination



mit dem Alter und dem Geschlecht auf  $\tau = 0.026$ . Mit 30 Kategorien für die Fahrtzwecke und 3 Altersklassen ergeben sich 180 verschiedene Werte für  $r$ , bzw.  $q$ . Zur Kalibrierung werden die mittleren Entfernungen der Wege eines Simulationslaufes mit den mittleren Entfernungen der Wege aus *Mobilität in Deutschland 2002* (MID) [13] verglichen. Tabelle 3.2 zeigt die Werte von  $r$  für die Wegezwecke *Einkaufen* und *Arbeiten*. Die mittleren Entfernungen lassen sich für *Einkaufen* angleichen, während für *Arbeiten* in der Simulation meist nur kleinere Werte erhalten werden. Das wird auch beim Vergleich der Wegelängenverteilungen deutlich (siehe Abschnitt 3.4.1). Hier macht sich bemerkbar, daß in der Realität etliche Personen auf dem Weg zur Arbeit Strecken zurücklegen, die nicht innerhalb des Stadtgebietes liegen können.

### 3.2.2 Modellvarianten

Im Modell werden keine synthetischen Tagespläne erzeugt. Die Zeitverwendungsmuster sind aus Erhebungsdaten abgeleitet und werden über soziodemographische Variablen den Personen zugeordnet. Das Modell muß auf Abweichungen der Reisezeiten in der Simulation gegenüber den Zeiten, die in den Tagebüchern dafür vorgesehen waren, reagieren: Wenn diese Abweichungen zu groß sind, ist es nicht mehr wahrscheinlich, daß der Tagesablauf und die damit verbunden Wege im Untersuchungsgebiet stattfinden können. In einer ersten Modellvariante ( $\tilde{f}$ ) wurde bei großen Abweichungen ein neues Zeitverwendungsmuster herangezogen. Damit ist die Möglichkeit gegeben, daß sich auf kleinräumiger Skala die Tagesabläufe unterscheiden, etwa dadurch, daß bei ungünstigen Verkehrsbedingungen weniger Wege unternommen werden, indem bestimmte außerhäusige Aktivitäten seltener sind oder indem Wege zu Touren verbunden werden.

Es ist jedoch fraglich, ob die Reaktion der Personen auf diese Weise angemessen abgebildet wird. Der Auswahlprozeß begünstigt immer Zeitverwendungsmuster mit wenigen Wegen. Zum einen ist es hier wahrscheinlicher, daß eine Kombination von Zielen und Verkehrsmitteln gefunden wird, die nur geringe zeitliche Abweichungen hervorruft. Zum andern ist die Empfindlichkeit gegenüber den Abweichungen in Zeitverwendungsmustern mit mehreren Wegen (und somit in der Regel kürzeren Episoden) systematisch höher als in Zeitverwendungsmustern mit wenigen Wegen. Es gibt keinen Mechanismus der dem entgegenwirkt, etwa indem bei guter Erreichbarkeit die Tendenz bestünde, möglichst viele Wege unterzubringen. Daher ist ein Vergleich der Zeitverwendungsmuster untereinander problematisch. Jetzt werden, für den Fall, daß ein Zeitverwendungsmuster nicht umsetzbar ist, mehrere Male neue Ziele gewählt. Nach einer gewissen Zahl von

	MiD	$f_1$	$f_{0.5}$	$f_{2.0}$	$f_\infty$	$\tilde{f}_1$
Wege pro Person	3.7	3.8	3.6	4.1	4.4	3.3
Wege insgesamt [ $\times 10^6$ ]	— <sup>1</sup>	3.28	3.05	3.49	3.81	2.75
MIV-Wege [ $\times 10^6$ ]	—	1.21	1.16	1.23	1.06	1.01
Anteil MIV-Wege [%]	38	37	38	35	23	37
mittlere Wegelänge [km]	6.3	4.6	4.6	4.7	5.2	6.1
mittlere Reisezeit pro Weg [min]	19.6	17.1	16.9	17.7	23.7	18.5
Strecke pro Person und Tag [km]	23.4	17.7	16.4	19.1	23.1	15.5
Reisezeit pro Person und Tag [min]	73	66	60	72	105	59
mittlere Wegelänge (MIV) [km]	8.8	6.0	6.0	6.2	6.1	6.1
mittlere MIV-Reisezeit pro Weg [min]	19.6	13.7	13.7	13.9	13.9	13.9
MIV-Strecke insgesamt [ $\times 10^6$ km]	—	7.34	6.93	7.62	6.47	6.17

Tabelle 3.3: Vergleich der Verkehrsnachfrage für verschiedene Modellvarianten und die Erhebung Mobilität in Deutschland 2002 (MiD).  $f_1$ : Ergebnisse für Standardparameter,  $f_{0.5}$ : Halbierung der zeitlichen Flexibilität der Episoden,  $f_{2.0}$ : Verdopplung der zeitlichen Flexibilität der Episoden,  $f_\infty$ : Episoden sind beliebig verschiebbar und dehnbar,  $\tilde{f}_1$ : Bei großer zeitlicher Verschiebung wird ein neues Zeitverwendungsmuster gewählt.

<sup>1</sup>Die Stichprobe aus MiD bezieht sich nicht auf das Untersuchungsgebiet.

Wiederholungen wird dann doch das Muster gewechselt, um eine Endlosschleife zu vermeiden (Variante  $f_1$ ). Tabelle 3.4 zeigt die Verteilung in Zahl der Wege pro Tagesplan in den beiden Varianten. In der Spalte unter  $f_\infty$  finden sich die Werte, wenn die Zeitverwendungsmuster immer übernommen werden. Tage mit vier oder mehr Wegen sind hier deutlich häufiger im Vergleich zu den Daten aus *Mobilität in Deutschland 2002* [13]. Die Diskrepanz ist besonders hoch bei Tagen mit acht oder mehr Wegen. Sie erklärt sich daraus, daß bei der Korrektur der Tagebücher immer Wege angenommen wurden, wenn von einer Aktivität zuhause zu einer Aktivität außer Haus gewechselt wurde. Wenn hier keine Wege berichtet wurden, handelt es sich meistens um Aktivitäten in unmittelbarer Umgebung des Wohnortes. Es muß je nach Anwendungsfall entschieden werden, wie solche Wege im Modell zu behandeln sind. Gegebenenfalls müssen für diese Aktivitäten entsprechende Gelegenheiten vorgesehen sein. Aus der Tabelle wird ersichtlich, wie sich durch die Ablehnung von Zeitverwendungsmustern die Häufigkeiten in Bezug auf die Wege pro Tag verändern. In der Variante  $\tilde{f}$  nimmt der Anteil der Tage mit nur zwei

Wege pro Tag	Anteile in %			
	MiD	$f_1$	$f_\infty$	$\tilde{f}_1$
1	4	1	1	2
2	31	29	23	42
3	12	14	11	15
4	25	28	25	24
5	9	12	13	8
6	10	9	12	6
7	4	4	6	2
$\geq 8$	5	3	9	1

Tabelle 3.4: Verteilung der Zahl der Wege pro Tag für verschiedene Modellvarianten.

Wegen stark zu, vor allem zu Lasten der Tage mit mehr als fünf Wegen. In der Variante  $f_1$  ist dieser Effekt weniger deutlich, und die Häufigkeiten sind mit denen der Erhebungen vergleichbar. Durch die Ablehnung wegereicher Tagebücher sinkt der Anteil von MIV-Wege. Es verschwinden also solche Wege, die typischer Weise nicht mit dem Pkw zurückgelegt werden.

Die Spalten  $f_1$ ,  $f_{0.5}$  und  $f_{2.0}$  geben Aufschluß über die Empfindlichkeit des Modells in Bezug auf die Toleranz der Episoden gegenüber Verschiebungen und/oder Veränderung der Dauer (Parameter  $\alpha$  und  $\beta$  in Abschnitt 2.7). Man beachte, daß die Zielwahl nur für  $f_1$  kalibriert wurde. Die Zahl der MIV-Wege verändert sich bei einer Verdopplung oder Halbierung der Werte für  $\alpha$  und  $\beta$  nur um fünf Prozent. Das Modell ist also robust gegenüber Veränderungen der Werte von  $\alpha$  und  $\beta$ , die nur anhand von Plausibilitätsüberlegungen festgelegt werden konnten.

Bei der Verkehrsmittelwahl wird jeweils überprüft, ob Pkw des Haushaltes für die Zeitspanne der zu planenden Tour von anderen Haushaltsmitgliedern benutzt werden. Wenn das der Fall ist, verändert sich die Auswahlwahrscheinlichkeit für das Verkehrsmittel entsprechend. In einer Simulation ohne Buchführung über die Pkw erhöht sich der Anteil der MIV-Wege um sechs Prozentpunkte, zu Lasten aller anderen Verkehrsmittel außer *Pkw-Beifahrer*. Die Vernachlässigung der Tatsache, daß Pkw nicht gleichzeitig genutzt werden können, hat also einen erheblichen Einfluß auf das Aufkommen an Pkw-Fahrten. Deren Zahl erhöht sich um knapp 15%, da auch die Zahl der Wege pro Person leicht zunimmt. Dabei können nur in 141 000 Haushalten von den 509 000 Haushalten der

synthetischen Bevölkerung Konflikte bei der Pkw Nutzung auftreten, da nur dort mehr Erwachsene zusammenleben als Pkw vorhanden sind.

### 3.3 Vergleich mit einer zonenbasierten Start-Ziel-Matrix

Die hier zu Vergleichszwecken herangezogene Start-Ziel-Matrix wurde im Projekt STADT-INFOKÖLN [35] erzeugt. Für die Erstellung einer Kurzfristprognose werden aktuelle Meßwerte zur Verkehrslage kombiniert mit typischen Quelle-Ziel-Matrizen für bestimmte Zeitpunkte. Die vorliegende Quelle-Ziel-Matrix beschreibt mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde das Verkehrsgeschehen für einen Werktag.

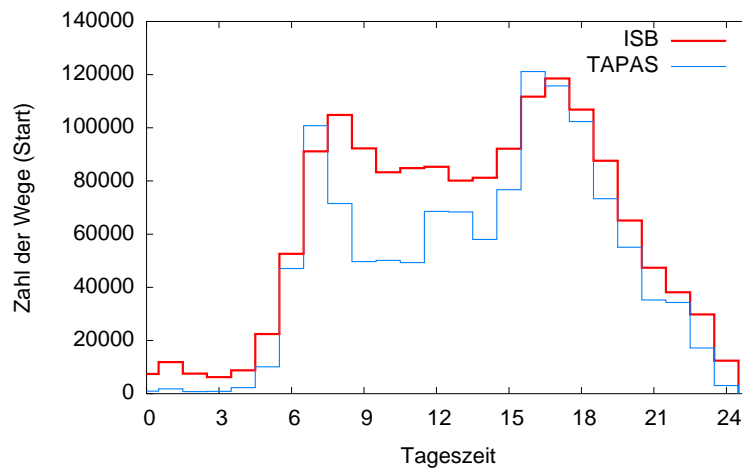


Abbildung 3.3: Vergleich der Verkehrsnachfrage (MIV) im Laufe des Tages aus der Vergleichsmatrix und der Simulation.

Das Verfahren basiert auf einer Einteilung der Stadt in 691 Verkehrszellen [63]. Die Verkehrserzeugung wird außerdem nach sogenannten verhaltenshomogenen Gruppen aufgeteilt, diese sind beschrieben durch die Merkmale *Alter*, *Erwerbstätigkeit* und *Pkw-Verfügbarkeit*. Neben der Bevölkerungszusammensetzung enthalten die Verkehrszellen Daten zu Schulplätzen, Arbeitsplätzen und anderen möglichen Zielen für Wege. Für jede Personengruppe und Verkehrszelle wird dann aufgrund von empirisch ermittelten Mobilitätsraten das Wegeaufkommen ermittelt. Die Verkehrsverteilung beruht auf einem Gravitationsansatz (siehe Abschnitt 1.1), und die Verkehrsmittelwahl wird anhand eines Probit-Modells geschätzt, in das die Reisezeiten eingehen. Mit der beschriebenen Vorgehensweise wird der Binnenverkehr erfaßt. Für die Ergänzung mit grenzüberschreitendem Verkehr vom und ins Umland und Durchgangsverkehr wird auf Zählungen von

durchschnittlichem Tagesverkehr (DTV) zurückgegriffen, der mit einer Ganglinie versehen wird.

Abbildung 3.3 zeigt die Zahl der Wege, die in jeder Stunde des Tages beginnen. Die durchgezogene Linie entspricht den Daten der Matrix aus STADTINFOKÖLN (nur Binnenverkehr), die gestrichelte Linie den Daten der Simulation. Die Matrix weist durchgehend ein stärkeres Verkehrsaufkommen aus als die Simulation. Das gilt besonders für die Zeit zwischen der Vormittagsspitze und der Nachmittagsspitze, also zwischen 8 Uhr und 16 Uhr. Die Zeitbudgeterhebung, auf der die Simulation beruht, enthält keine Wege während der Arbeitszeit. Solche Wege kommen aber in den Mobilitätsraten für die Matrix vor.

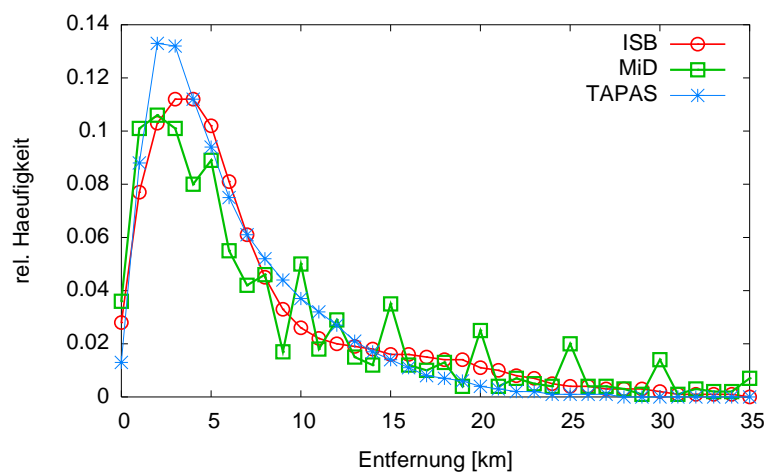


Abbildung 3.4: Verteilung der Entfernungen für MIV-Wege in Mobilität in Deutschland 2002, der Vergleichsmatrix und der Simulation.

Die Verteilungen der Wegelängen (Abbildung 3.4) für MIV-Wege weisen für die Matrix, die Daten aus *Mobilität in Deutschland 2002* und die Simulation die gleiche Form auf. Das Maximum wird in der Simulation allerdings bei nur 2 km erreicht, während es in den anderen Fällen bei 3 bis 4 km liegt und weniger stark ausgeprägt ist. Eine Ursache hierfür ist möglicherweise, daß bei der Verkehrsmittelwahl Subtouren nicht eigens modelliert werden, so daß hier im Modell MIV-Wege anfallen, die in der Realität als Teil einer Subtour zu Fuß bewältigt werden. Wenn man von den Differenzen im Verkehrsaufkommen um die Mittagszeit absieht, ist die Ähnlichkeit der Ergebnisse bemerkenswert, angesichts der Tatsache, daß völlig unterschiedliche Ansätze verwendet wurden.

## 3.4 Entfernungen und Reisezeiten

### 3.4.1 Verteilungen aus Erhebungen und der Simulation

Die beste Prüfung für das Verhalten des Simulationsmodells bestünde in einer Validierung jedes einzelnen Modellschrittes anhand von Daten aus dem Untersuchungsgebiet. Es wäre also zu zeigen, daß die simulierte Zeitverwendung der Zeitverwendung der Kölner Bevölkerung entspricht und daß die Wahl der Ziele und die Wahl der Verkehrsmittel mit dem Mobilitätsverhalten der Menschen übereinstimmen. Entsprechende Daten zum Mobilitätsverhalten konnten im Rahmen der Arbeit weder beschafft noch erhoben werden. Daher werden typische Merkmale der Verkehrsnachfrage, wie die Verteilung der Wegelängen und die Verteilung der Reisezeiten mit deutschlandweiten Daten aus den Erhebungen *Mobilität in Deutschland 2002* [13], dem *deutschen Mobilitätspanel* [15] und der Zeitbudgeterhebung [21, 38] verglichen.

In Abbildung 3.5 ist die Verteilung der Entfernungen zu sehen wie sie einerseits in den Daten von *Mobilität in Deutschland 2002* (MiD) [13] und im deutschen Mobilitätspanel [15] dokumentiert sind und sich andererseits für die Simulation für Köln ergeben. Für die Kurve aus MiD und MOP wurden nur Wege verwendet, die werktags in den Kreistypen 1 und 2 (höchste Dichte, nach der Klassifizierung des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung [12]) zurückgelegt wurden. Das sind 49 000 bzw. 79 000 Wege. Im Unterschied zur Erhebung *Mobilität in Deutschland* werden die Haushalte im deutschen Mobilitätspanel wiederholt über ihr Mobilitätsverhalten befragt. Der Befragungszeitraum ist eine Woche, und die Wiederholung findet nach einem Jahr statt [15]. Der Abbildung liegen die Wege der Jahre 1994 bis 2001 zugrunde. Es werden verschiedene Wegezwecke unterschieden: *Arbeit*, *Einkaufen*, *Schule* und *andere Aktivitäten*. Bis auf den Wegezweck *Arbeiten* sind die Verteilungen ähnlich in ihrer Form (unimodal, rechts-schief), die Lage des Modus ist aber deutlich verschieden. Für den Wegezweck *Einkaufen* und *andere Aktivitäten* sind kurze Wege häufiger als für Arbeits- oder Schulwege. Die Verteilungen aus den Erhebungen haben die Besonderheit, daß bei ‚runden‘ Werten für die Entfernung Spitzen auftreten, da die Befragten die Entfernungen nur ungefähr kennen. Das ist besonders deutlich bei den Aktivitäten *Arbeiten* und *Schule*, bei denen größere Entfernungen vorkommen. Allen Aktivitäten ist gemeinsam, daß die Simulation die Häufigkeit sehr kurzer Wege unter zwei Kilometern und langer Wege (etwa über 15 Kilometer) unterschätzt. Der Modus der Verteilung liegt für die Simulation hingegen immer bei größeren Werten im Vergleich zu den erhobenen Daten. Die kleineren Häufigkeiten bei kurzen Wegen sind möglicherweise auf die begrenzte räumliche Auf-

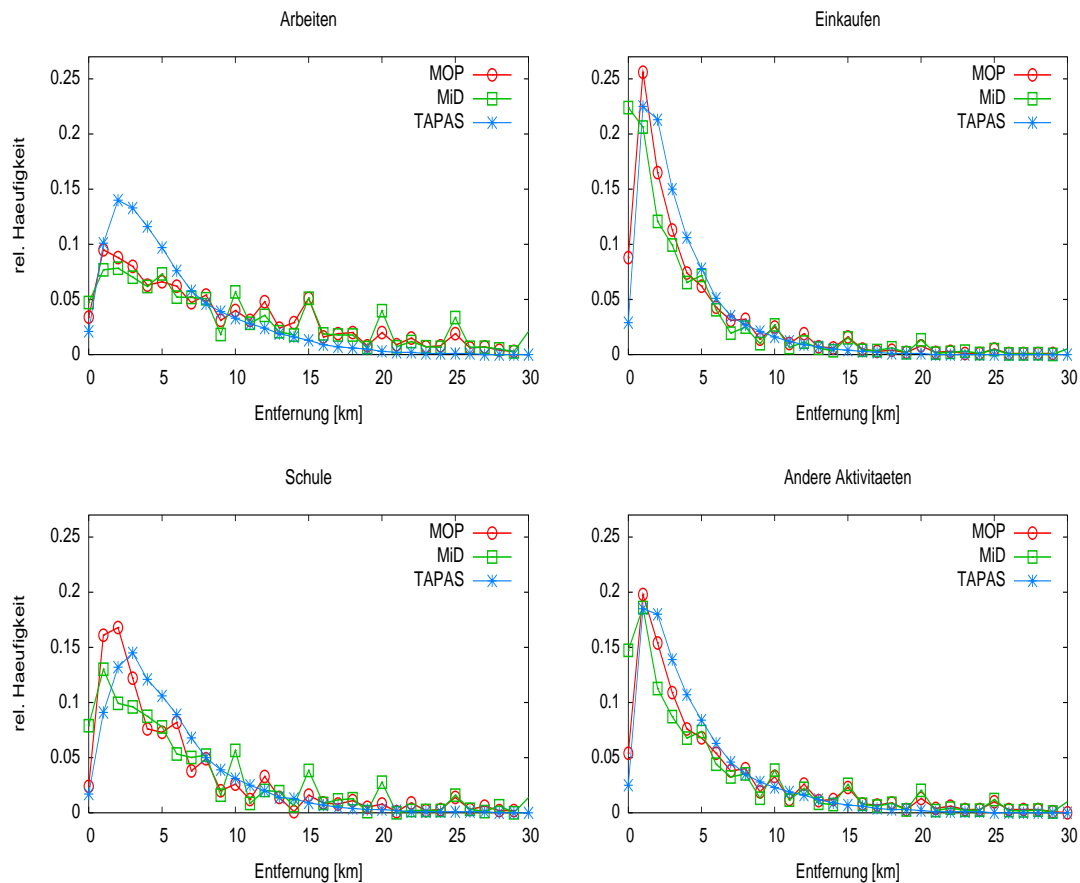


Abbildung 3.5: Entfernungen für verschiedene Wegezwecke in Mobilität in Deutschland 2002 (MiD), im deutschen Mobilitätspanel (MOP) und der Simulation.

lösung bei den Wohnstandorten zurückzuführen. Sehr lange Wege sind deswegen in der Fallstudie selten, weil — wie oben schon erwähnt — das Untersuchungsgebiet begrenzt ist, und Fahrten über die Stadtgrenzen hinaus nicht auftreten können. Bei Arbeitswegen ist kritisch zu hinterfragen, ob das Modell der *intervening opportunities* anwendbar ist. Arbeitsplätze sind sehr spezifisch und für die Entfernung zur Arbeit sind auch Motive bei der Wahl des Wohnstandorts entscheidend, die vom Modell nicht erfaßt werden. Abweichungen bei den Verteilungen sind auch deshalb zu erwarten, weil die Lage von Gelegenheiten und Wohnstandorten, so wie sie gerade in Köln vorgefunden wird, einen Einfluß hat. Es ist plausibel, daß das zum Beispiel bei den Schulwegen eine Rolle spielt.

Bei den Reisezeiten bezogen auf einzelne Wege (siehe Abbildung 3.6) finden sich ähnliche Charakteristika wie bei den Entfernungen: In den Erhebungsdaten sind die Häu-

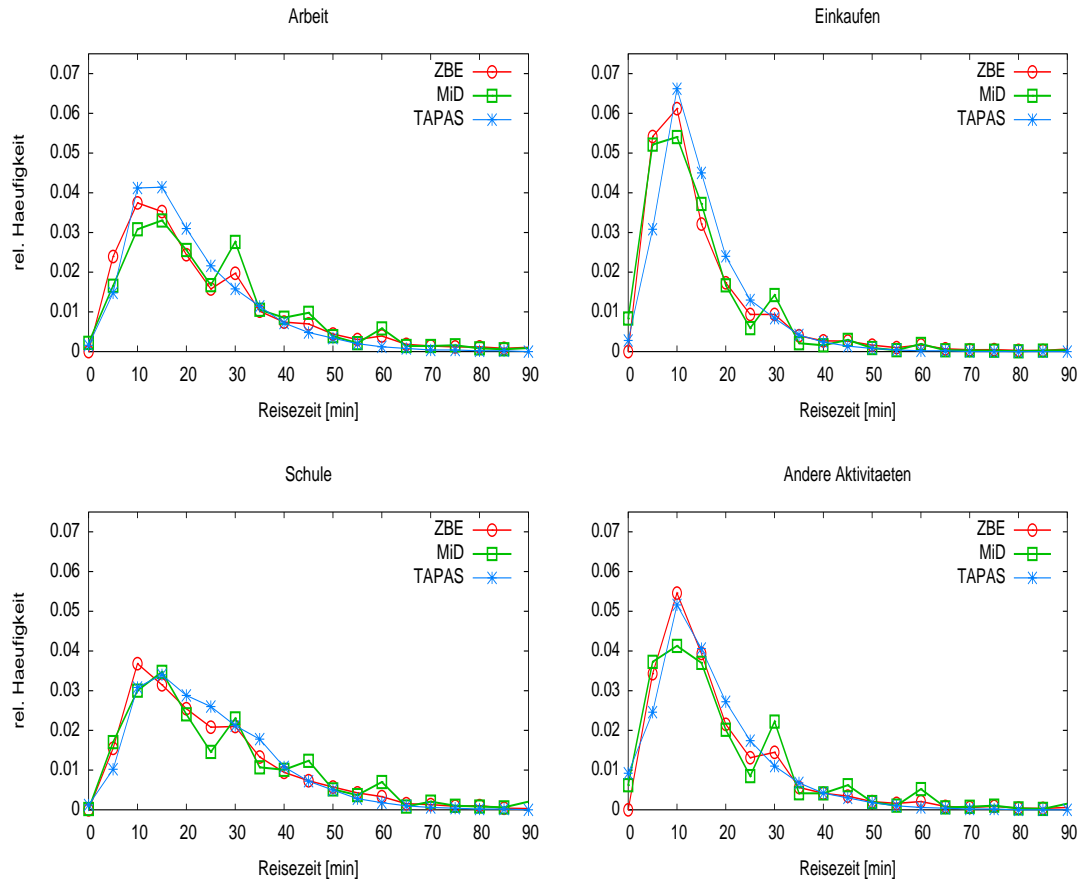


Abbildung 3.6: Reisezeiten für verschiedene Wegezwecke in der Zeitbudgeterhebung, in Mobilität in Deutschland 2002 und der Simulation.

figkeiten bei 30, 45 und 60 Minuten überhöht. Das Modell liefert geringere Häufigkeiten für sehr kurze Reisezeiten. Die Maxima der Kurven liegen für die Simulationsdaten und die Erhebungsdaten aber näher beieinander. Besonders bei den Arbeitswegen ist auch die Diskrepanz der Kurven deutlich geringer als bei den Entfernungen.

### 3.4.2 Räumliche Betrachtung

Für das Modell wurden sowohl für die Bevölkerung als auch für die Gelegenheiten nur das Stadtgebiet betrachtet. Verkehrsströme sind aber nicht durch administrative Grenzen beschränkt. Entsprechend wurde die Nachfrage ergänzt um diejenigen Fahrten aus der Nachfragematrix aus STADTINFOKÖLN, die nicht im Stadtgebiet starten, also Einpendler und Durchgangsverkehr. Abbildung 3.7 zeigt den Mittelwert der Entfernung pro Weg



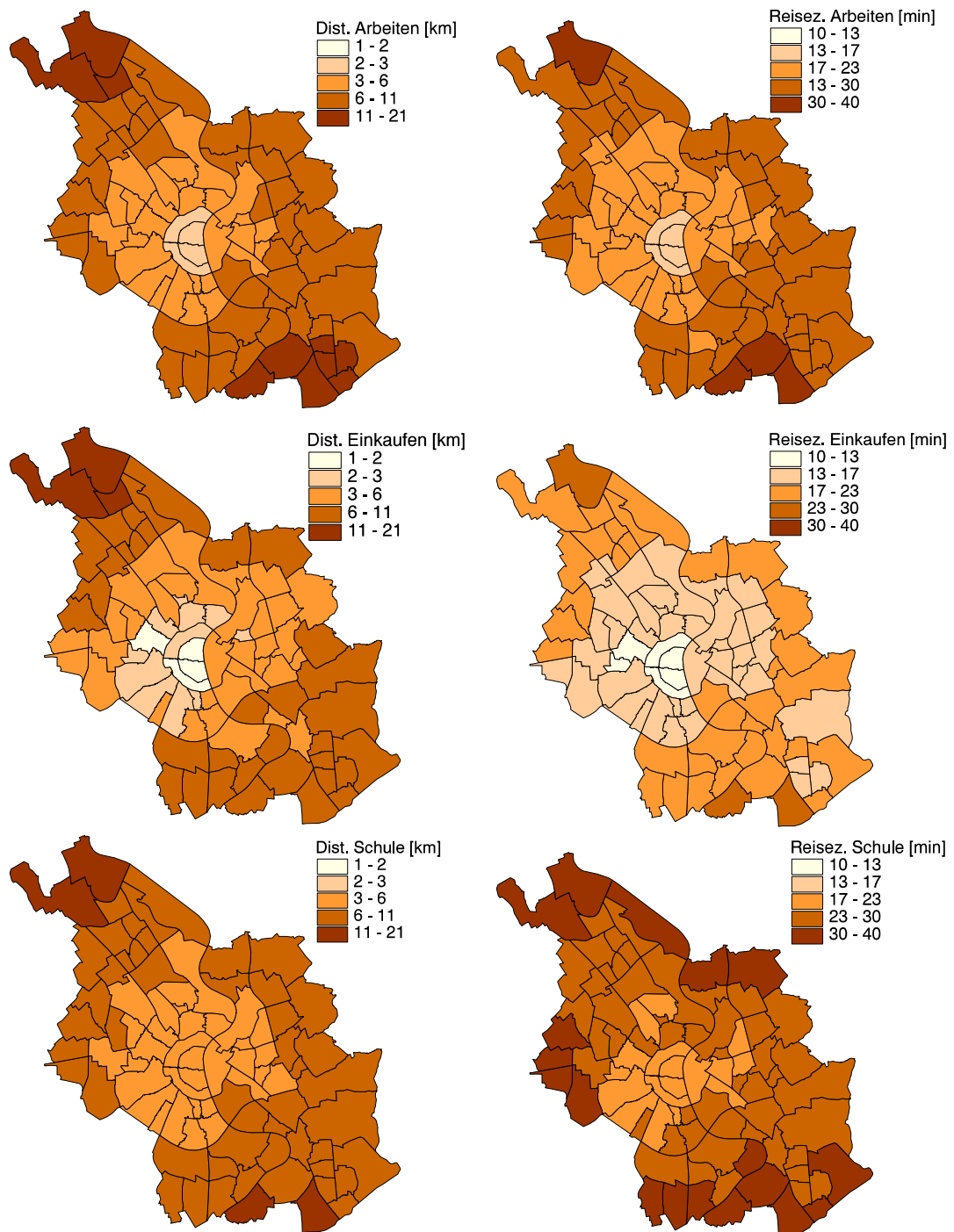


Abbildung 3.7: Mittlere Entfernungen und Reisezeiten pro Weg für verschiedene Aktivitäten.

und Person für die einzelnen Stadtteile aufgeteilt nach den Wegezwecken *Arbeit*, *Einkaufen*, *Schule*. Bei den Wegezwecken *Arbeit* und *Einkaufen* fällt auf, daß die Menschen im Stadtzentrum von der hohen Dichte möglicher Ziele profitieren. Das Ungleichgewicht ist beim Wegezweck *Arbeiten* besonders stark ausgeprägt. Die Werte für die Randbezirke sind allerdings dadurch überhöht, daß die Personen im Modell nur Ziele innerhalb der Stadt wählen können, während in der Realität auch nähergelegene Ziele außerhalb der Stadt aufgesucht werden. Die Bevölkerungsdichte ist dort allerdings sehr gering (vgl. Abbildung 3.1). Wie auch schon in den Verteilungen sichtbar, sind die Wege zum Einkaufen im Mittel kürzer als Arbeitswege. Der Bereich, wo solche Wege im Mittel unter drei Kilometern liegen, dehnt sich jetzt auf die Stadtteile aus, die den Stadtkern umschließen. Bei den Wegen zur Schule liegen alle Mittelwerte zwischen drei und zehn Kilometern, wenn man von den Randbezirken absieht. Die Erreichbarkeit ist also relativ ausgewogen.

Die mittleren Wegedauern (Abbildung 3.7 rechte Seite) folgen in ihrer räumlichen Verteilung den Entfernungen. Im Vergleich zu den Entfernungen heben sich bei den Wegedauern die Schulwege noch deutlicher von den anderen Wegezwecken ab, da hier der Pkw als schnelles Verkehrsmittel seltener genutzt wird. Die Nebenzentren (z.B. Kalk und Porz) zeichnen sich in Bezug auf die Mittelwerte der Entfernungen und Wegedauern nicht aus. Lediglich Porz fällt im Vergleich zu den umgebenden Stadtteilen bei den Entfernungen von Einkaufswegen in eine niedrigere Kategorie.

### 3.5 Linke und rechte Rheinseite

Der historische Kern der Stadt liegt auf der linken Rheinseite. Zur Zeit der Industrialisierung hat sich die Stadt aber auf die andere Flußseite ausgedehnt, und das Stadtgebiet hat sich dort durch die Gebietsreform 1975 nochmals vergrößert. Der Rhein bildet eine natürliche Trennungslinie. Im folgenden wird gezeigt, wie sich die Unterschiede in der räumlichen Struktur in einigen Kenngrößen der Verkehrsnachfrage niederschlagen und wie sich die Situation verändert, wenn angenommen wird, eine der Rheinbrücken, die Deutzer Brücke, sei für den Pkw-Verkehr gesperrt.

Die Einwohner auf der linken Rheinseite legen täglich eine Strecke von 15.5 km zurück, die Einwohner der rechten Rheinseite müssen eine rund fünf Kilometer längere Strecke bewältigen (Tabelle 3.5). Die Brückensperrung zwingt zu längeren Wegen und entsprechend größeren Reisezeiten. Die Zahl der Wege reduziert sich auf beiden Rheinseiten geringfügig und die Attraktivität des Pkw sinkt: Der Anteil der MIV-Wege fällt um

	Wohn- ort	Brücke offen	Brücke gesperrt
Wege pro Person	links	3.84	3.74
	rechts	3.73	3.66
Wege insgesamt [ $\times 10^6$ ]	links	2.1	2.0
	rechts	1.1	1.1
MIV-Wege [ $\times 10^6$ ]	links	0.72	0.67
	rechts	0.46	0.44
Anteil MIV-Wege	links	0.35	0.33
	rechts	0.40	0.38
Strecke pro Person und Tag [km]	links	15.5	15.4
	rechts	20.5	20.5
Reisezeit pro Person und Tag [min]	links	65	65
	rechts	70	71
mittlere Weglänge (MIV) [km]	links	5.3	5.7
	rechts	6.9	7.1
mittlere MIV-Reisezeit pro Weg	links	14	15
	rechts	16	17

Tabelle 3.5: Kenngrößen der Verkehrsnachfrage unterschieden nach Wohnorten links und rechts des Rheins bei offener und gesperrter Deutzer Brücke.

jeweils zwei Prozentpunkte. Dabei gibt es jeweils einen deutlichen Unterschied zwischen den Einwohnern links und rechts des Flusses: 35% der Wege werden auf der einen Seite mit dem Pkw zurückgelegt, gegenüber 40% auf der anderen Seite (ohne Brückensper- rung).

Tabelle 3.6 weist die Anteile der den Rhein querenden Wege aus. Für die linke Rhein- seite gilt: nur 2.5% bzw. 2.6% der Wege führen über den Fluß. (Die Werte sind nicht exakt gleich, da Wege nach Mitternacht enden, aber nicht vor Mitternacht beginnen können.) Die Sperrung der Deutzer Brücke führt nur zu wenig Veränderung. Für die Einwohner der rechten Rheinseite sind die Auswirkungen größer. Der Anteil des querenden Verkehrs geht von 13.2% auf 11.2% zurück.

		Brücke offen		Brücke gesperrt	
Wohnort	Richtung	Anzahl [ $\times 10^3$ ]	Anteil	Anzahl [ $\times 10^3$ ]	Anteil
links	l $\rightarrow$ l	1987	94.6	1941	94.9
	l $\rightarrow$ r	54	2.6	50	2.4
	r $\rightarrow$ l	53	2.5	48	2.3
	r $\rightarrow$ r	6	0.3	6	0.3
rechts	l $\rightarrow$ l	37	3.2	29	2.5
	l $\rightarrow$ r	151	13.0	126	11.2
	r $\rightarrow$ l	153	13.2	127	11.3
	r $\rightarrow$ r	818	70.6	853	75.1

Tabelle 3.6: Anteile der Wege, die den Rhein queren, nach Wohnstandorten bezogen auf den Rhein bei offener und gesperrter Deutzer Brücke

Abbildung 3.8 zeigt die Belastung des Straßennetzes für die Referenzsituation und für den Fall, daß die Deutzer Brücke nicht benutzbar ist. Die Breite der Streckenabschnitte wächst in der Darstellung mit der Summe der Fahrzeuge, die im Laufe des Tages passieren (DTV-Werte). In den unteren Abbildungen sind die Differenzen der DTV-Werte in feinerer Skalierung dargestellt. Links: Streckenabschnitte, auf denen der Verkehrsfluß abnimmt, rechts: Streckenabschnitte, auf denen er zunimmt. Die Verkehrsnachfragesimulation reagiert auf die Rückmeldung über die verminderte Erreichbarkeit der jeweils anderen Rheinseite mit einer generellen Abnahme der Pkw-Fahrten über den Rhein (siehe oben). So nimmt auch der Verkehr auf den anderen Rheinbrücken ab, sowie in der gesamten Innenstadt und auf den Zubringern zur Autobahn. Ein weiterer Effekt ist die Zunahme auf dem östlichen Autobahnring, der verstärkt für die Umfahrung der Innenstadt genutzt wird. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, daß die Verkehrsabwicklung an den Knotenpunkten flüssiger wird, wegen des geringeren Zuflusses durch die rechtsrheinischen Zubringer. Dem zusätzlichen Verkehr über die südliche Autobahnbrücke und den östlichen Autobahnring entspricht eine Abnahme des Verkehrs über den westlichen Autobahnring und die nördliche Autobahnbrücke.

Obwohl die Veränderung durch die Brückensperrung in den allgemeinen Kennzahlen des Verkehrsaufkommens klein ist, nimmt die Zahl der Fahrzeuge, die täglich den Rhein queren, um 42462 oder 24% ab. Bezieht man diese Abnahme auf die Verkehrsmenge über die Deutzer Brücke vor der Sperrung ergeben sich 143%. Dieser Wert verdeutlicht, daß nicht nur die Verkehrsmenge über die Deutzer Brücke entfällt, sondern zusätzlich die

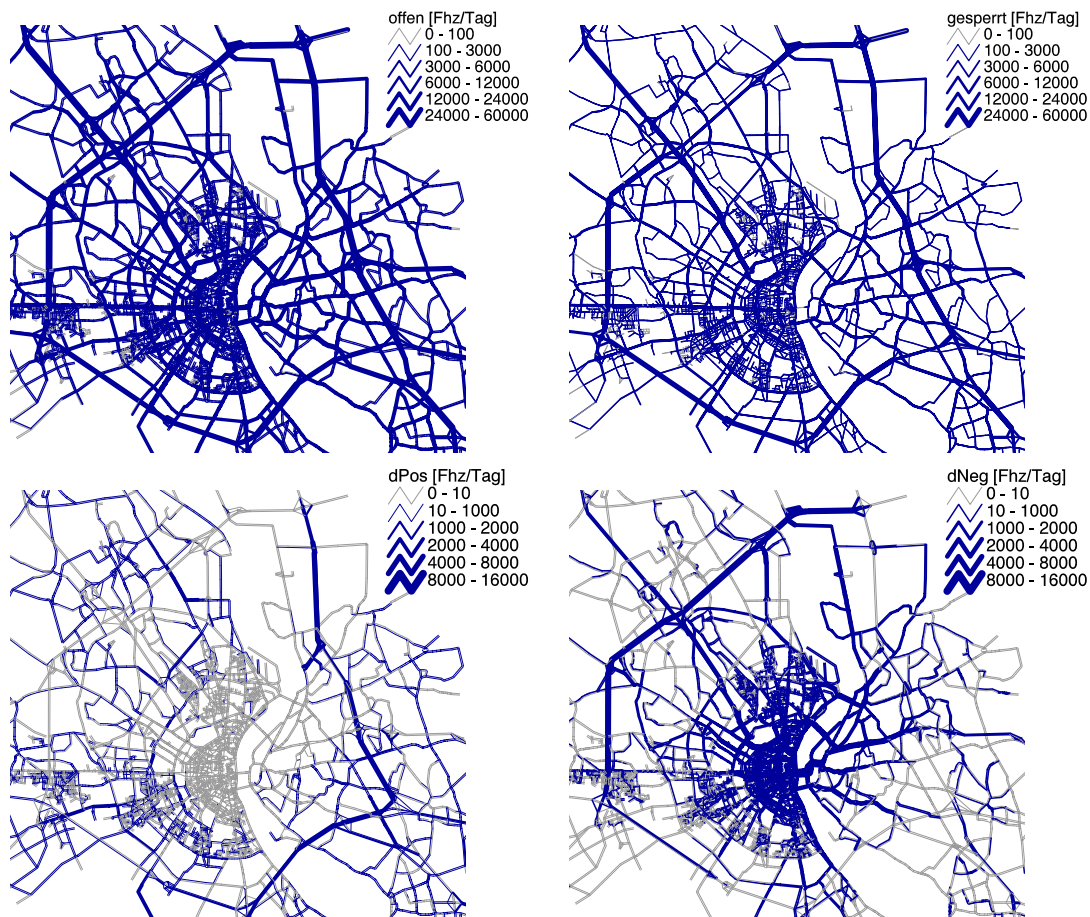


Abbildung 3.8: Oben: Belastung des Straßennetzes: Zahl der Fahrzeuge pro Tag auf den Streckenabschnitten (DTV-Werte) jeweils bei offener und geschlossener Deutzer Brücke. Unten: Verkehrszunahme (links) und Verkehrsabnahme (rechts) durch die Sperrung.

Zahl der Wege über die anderen Brücken kleiner wird. Auch wenn die einzelnen Prozesse, die dazu führen, im Rahmen dieser Arbeit nicht validiert werden können, so ist doch bemerkenswert, daß eine solche Tendenz auch bei der Verringerung von Verkehrskapazitäten in der Praxis beobachtet werden kann. Cairns *et al.* [14] haben in einer Metastudie über 70 Fallbeispiele untersucht, wie sich die Verkehrsmengen verändern, „sobald Verkehrsflächen entfallen, sei es durch geplante Maßnahmen, vorübergehende Straßensperren für Instandhaltung oder Erneuerung oder Naturkatastrophen“. Betrachtet wird der Quotient

$$\frac{(C + D) - (A + B)}{A},$$

- A: Verkehrsmenge auf der betrachteten Verkehrsverbindung vorher,
- B: Verkehrsmenge auf Alternativrouten vorher,
- C: Verkehrsmenge auf der betrachteten Verkehrsverbindung nachher,
- D: Verkehrsmenge auf Alternativrouten nachher.

In der überwiegenden Zahl der Fälle ist ein Rückgang der Verkehrsmenge zu beobachten, und dieser Quotient wird negativ. Sein Mittelwert liegt bei -22%, der Median beträgt -11%, und in etlichen Fällen werden auch Werte kleiner hundert Prozent berichtet. Die Werte sind allerdings nur bedingt vergleichbar, da sie von den räumlichen Bedingungen abhängen und von der Festlegung der Alternativrouten. Die Autoren weisen darauf hin, daß die Reaktionsmöglichkeiten der Verkehrsteilnehmer vielfältig sind. Die Simulation kann aufzeigen, welche Reaktionen denkbar sind, welches Potential sie haben, und welche Einschränkungen die Verkehrsteilnehmer dadurch auf sich nehmen.

# Kapitel 4

## Schlußfolgerungen

Bei der aktivitätenbasierten Modellierung von Verkehrsnachfrage ist man mit einer großen Zahl von möglichen Realisierungen von Tagesabläufen und den damit verbundenen Wegen konfrontiert. Die Realisierungen lassen sich gliedern nach den verschiedenen Aspekten eines Tagesablaufs:

- Zeitverwendung: Reihenfolge und Dauer von Aktivitäten und Wegen,
- Orte, an denen Aktivitäten stattfinden,
- Verkehrsmittel, mit denen die Wege zurückgelegt werden.

Im vorliegenden Modell werden mit einem mikroskopischen Ansatz diese Aspekte simuliert in Abhängigkeit von Eigenschaften der Person und der Umgebung, in der sie lebt. Es wird davon ausgegangen, daß zumindest für das Verkehrsaufkommen an Werktagen die Randbedingungen dominierend sind (siehe Abschnitt 2.1). Sie werden über folgende Mechanismen in das Modell integriert:

- Beachtung des zeitlichen und logischen Zusammenhangs der Wege eines Tages,
- Verfügbarkeit von Pkw,
- Rückkopplung der Reisezeiten für die kombinierte Verkehrsmittel- und Zielwahl.

Jeder dieser Mechanismen wirkt auf alle Aspekte. Lediglich die Auswirkung der Pkw-Verfügbarkeit auf die Zeitverwendung wird nicht modelliert.

Der zeitliche und logische Zusammenhang der Wege eines Tages ist exogen: Die Zeitverwendung wird aus empirisch erhobenen Tagebuchdaten abgeleitet. Bei der Aufbereitung der Daten wird allerdings die Konsistenz der Wege sichergestellt. Es werden

nur Tagesabläufe akzeptiert, deren außerhäusige Aktivitäten über Wege verbunden sind. In bestimmten Fällen werden Wege eingesetzt oder Aktivitäten, die möglicherweise an einem Ort stattfanden wurden so kodiert, daß eine Zielwahl möglich wird. Das entsprechende Verfahren ist aufgrund vieler Fallunterscheidungen, die beachtet werden müssen, aufwendig, aber ohne die Korrekturen könnten nur etwa 20% der Tagebücher verwendet werden.

Bei der Zielwahl ist die Abfolge der Aktivitäten relevant, wenn mehrere Aktivitäten in einer Tour miteinander verbunden werden. Der jeweils aktuelle Aufenthaltsort der Person ist ebenso Bezugspunkt für die Wahl des Ortes der nächsten Aktivität, wie die möglichen Orte für folgende Aktivitäten. Es ist nicht von vornherein klar, wie genau diese Abhängigkeit zu beschreiben ist. Um eindeutige Beziehungen zu erhalten, werden die Aktivitäten geordnet. Anstelle der chronologischen Reihenfolge wird eine Ordnung aufgrund der Dauer verwendet, so daß für die längste Aktivität einer Tour zuerst ein Ort festgelegt wird. Das Kriterium der Dauer muß in der Realität nicht immer zutreffen. Modifikationen in Bezug auf andere Aspekte lassen sich aber leicht integrieren, wenn empirisch besser begründete Verfahren für die Sortierung vorgeschlagen werden. Das Prinzip der hierarchischen Betrachtung der Ziele ist flexibel in Bezug auf Zahl und Zusammensetzung der Aktivitäten.

Die Gliederung der Tour in Aktivitäten mit verschiedener Hierarchiestufe wird auch verwendet, um sicherzustellen, daß individuelle Verkehrsmittel (Fahrrad oder Auto) entweder für alle Wege einer Tour oder gar nicht auf der Tour genutzt werden. Das Modell ließe sich hier erweitern durch die Einführung von Subtouren, für welche die Verkehrsmittelwahl wieder offen ist.

Der zweite oben angeführte Mechanismus ist die Berücksichtigung der Verfügbarkeit von Pkw. Bevor ein Verkehrsmittel für einen Weg oder eine Tour bestimmt wird, ermittelt das Programm, wieviele Pkw für den Zeitraum der Tour noch im Haushalt zur Verfügung stehen. Damit das möglich ist, müssen alle Pkw-Touren gebucht werden. Hier spielt dann die Reihenfolge eine Rolle, mit der die Personen eines Haushalts bearbeitet werden. Es werden keine Annahmen darüber gemacht, ob bestimmte Personen eines Haushalts bevorzugt Automobile nutzen können. In die Verkehrsmittelwahl gehen aber Eigenschaften der Person und der Wegezweck ein, so daß der Effekt einer Abstimmung innerhalb des Haushalts nicht sehr groß eingeschätzt wird. Eine Buchführung über die Verwendung von Pkw setzt einen personen- und haushaltsbezogenen Ansatz voraus. Wird über die Pkw nicht Buch geführt, steigt der Anteil der MIV-Fahrten um sechs Prozentpunkte (Abschnitt 3.2). Die Buchführung hat also einen erheblichen Einfluß, denn von der Verfügbarkeit eines



Pkw hängt nicht nur die Verkehrsmittelwahl sondern auch die Zielwahl ab.

Da die Reisezeiten, wie sie sich in der Simulation ergeben, in der Regel von den ursprünglich berichteten Reisezeiten abweichen, wird überprüft, ob der Tagesablauf noch plausibel ist. Andernfalls könnten sich die Wege im Extremfall zeitlich überschneiden, und man hätte eine wichtige Information, die sich daraus ergibt, daß einzelne Wege nicht unabhängig voneinander sind, ungenutzt gelassen. Als Maß für die Akzeptierbarkeit von zeitlichen Diskrepanzen dient im Modell die Variabilität, die sich aus dem Vergleich mit ähnlichen Tagebüchern ergibt. Die Festlegung, welches Tagebuch (oder genauer: welche Episode) ähnlich ist, enthält eine gewisse Beliebigkeit. Abschnitt 3.2 zeigt jedoch, daß die Verkehrsnachfrage nur in geringem Maße mit der Variation der Beweglichkeit der Episoden schwankt.

In einem ersten Ansatz wurden Tagespläne verworfen, wenn die zeitliche Diskrepanz ein bestimmtes Maß überschritt. Das führte dazu, daß Tagesabläufe mit weniger Fahrten bevorzugt wurden. Die Zahl der Wege pro Person und Tag fällt dadurch von ursprünglich 4.2 auf 3.0. Der Gedanke dabei war, daß Menschen ihre Zeit anders organisieren, auf Aktivitäten verzichten oder Wege zu Touren zusammenlegen, wenn die verkehrliche Situation ungünstig ist. Die Tage mit wenigen längeren Episoden sind jedoch allein durch die gröbere zeitliche Gliederung „unempfindlicher“ gegenüber Verschiebungen, und bei der Zielwahl läßt sich für weniger Ziele viel leichter eine Kombination von Zielen finden, die zu dem Tag „paßt“. Daher ist ein Vergleich der Tagebücher untereinander, wie ihn das Auswahlverfahren impliziert, nicht zu rechtfertigen. Stattdessen wird jetzt bei einem Überschreiten der tolerierbaren zeitlichen Verzerrungen versucht, den Tag zu realisieren, indem mehrmals neue Ziele und Verkehrsmittel gewählt werden.

Hier ist ein Ansatzpunkt für eine Erweiterung des Modells, die auch eine größere Reaktionsfähigkeit ermöglichen würde: Mit Informationen über die Art und Weise des Zustandekommens von Tagesplänen und welche Bedeutung dabei die lokalen Gegebenheiten haben, könnten Fälle nicht umsetzbarer Tagespläne besser behandelt werden. Mit neuen Erhebungsverfahren wird diese Thematik schon bearbeitet [19, 55]. Hier wäre es lohnend zu untersuchen, ob es Größen gibt, die nur geringen Schwankungen unterliegen. Wenn zum Beispiel das Zeitbudget für Einkäufe innerhalb einer Personengruppe annähernd konstant ist, die Aufteilung dieses Budgets in einzelne Einkäufe aber von den örtlichen Gegebenheiten abhängt, ergibt sich ein Ansatz für den Aufbau von Beziehungen untereinander austauschbarer Tagespläne.

Es wurde schon beschrieben, daß eine Verlängerung der Reisezeiten dazu führen kann, daß ein Tagesplan nicht realisiert werden kann. Die Reisezeiten gehen aber auch

in die Ziel- und Verkehrsmittelwahl ein: je schneller ein Ziel erreicht werden kann, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, daß eine geplante Aktivität dort stattfindet. Durch die unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Verkehrsmittel ergibt sich daraus der erwähnte Zusammenhang zwischen Pkw-Ausstattung und der Zielwahl. Trotz seiner Einfachheit ist der Ansatz der *intervening opportunities* erfolgreich, wenn man die Entfernungsverteilung der Wege betrachtet. Bei der Anwendung im Untersuchungsgebiet wurde der Parameter der Zielwahl indirekt bestimmt, indem die mittleren Entfernungen verglichen wurden, die bestimmte Personengruppen für verschiedene Aktivitäten zurücklegen. Es wäre reizvoll, den Parameter der Zielwahl direkt von Erhebungen abzuleiten. Dies ist mit erheblichem Aufwand verbunden, weil es neben einer Erfassung der Aufenthaltsorte auch detaillierte Daten über mögliche Alternativen erfordert, und ein Verständnis dafür, welche Orte für eine Aktivität überhaupt als Alternativen betrachtet werden. Mit Systemen, die Satellitenortung oder Ortung über Mobilfunkzellen einsetzen, läßt sich zumindest das Problem der automatisierten Geo-Codierung der Orte lösen [49]. Eine weitere Fragestellung in diesem Zusammenhang ist die Veränderung der Zielwahl und der Zeitverwendung differenziert nach den lokalen Gegebenheiten.

Die Verkehrsnachfrage hängt wesentlich von der räumlichen Verteilung von Wohnorten und Gelegenheiten ab. Besonders bei mikroskopischen Modellen besteht die Schwierigkeit darin, sicherzustellen, daß die verschiedenen Datenquellen miteinander vergleichbar sind. So müssen zum Beispiel die Ausprägungen der Aktivitäten für die Zeitverwendung, die Gelegenheiten und die Verkehrsmittelwahl miteinander übereinstimmen. Idealerweise müßten zur Untersuchung von Mobilitätsverhalten und zur Ableitung von Parametern für Modelle bei Erhebungsdaten jeweils bekannt sein, unter welchen Bedingungen das berichtete Verhalten zustandekam. Die Verkehrsmittelwahl in einem Haushalt mit einem Pkw mag anders sein, als die Verkehrsmittelwahl in einem Haushalt mit zwei Pkw, wenn einer unterwegs ist (wie hier unterstellt). Die Zielwahl wird neben den Ansprüchen an die Ziele auch von der Dichte der Ziele abhängen und davon, ob die Person unter Zeitdruck steht oder nicht.

Der Aspekt der Kosten ist in das Modell nicht integriert: Bei längeren Strecken konkurrieren der Privat-Pkw, der Öffentliche Verkehr und das Taxi. Der Anteil der Taxifahrten ist sehr klein, und die Entscheidung über die Anschaffung eines Autos ist exogen. Es ist im Rahmen der Arbeit nicht unternommen worden, die Wahrnehmung und die Bewertung der Zusatzkosten für die einzelne Fahrt zu modellieren.

Mit dem vorgestellten Modell läßt sich die Verkehrsnachfrage einer Millionenstadt in wenigen Stunden simulieren. Das ermöglicht die Rückkopplung mit der Simulation der

Routensuche. Für die Erweiterung der Szenarien auf extreme Verkehrssituationen ergeben sich besondere Anforderungen. Bei einer Sperrung der gesamten Innenstadt, wären zum Beispiel auch Wege in Betracht zu ziehen, die in mehreren Etappen mit verschiedenen Verkehrsmitteln zurückgelegt werden. Die Verkehrsfluß-Simulation muß in der Lage sein, auch die Überlastung des Verkehrsnetzes so zu behandeln, daß die Reisezeiten nicht über alle Maßen steigen, und so im nächsten Iterationsschritt die Verkehrsnachfrage überreagiert. Neben Szenarien mit einer veränderten Infrastruktur kann das Modell auch direkt mit Veränderungen in den anderen Eingabedaten betrieben werden: Bevölkerungsstruktur, Verkehrsmittelausstattung, Zeitverwendung, Lage von Gelegenheiten. Das erlaubt die Kopplung mit Modellsystemen, die auf größerer Zeitskala die Entwicklung einer Stadt betrachten [73].



# Kapitel 5

## Zusammenfassung

Der Transport von Gütern und die Mobilität der Menschen schaffen wichtige Voraussetzungen für das Wirtschaftsleben einer Stadt. Nicht zuletzt wegen der nachteiligen Folgen des Verkehrs ist er mit vielen anderen gesellschaftlich relevanten Themen verknüpft, wie Umweltschutz und Sicherheit bis hin zum Problem sozialer Ausgrenzung. Man versucht, das Zustandekommen der Verkehrsnachfrage zu modellieren, um Möglichkeiten zur Veränderung des Verkehrssystems zu erkennen, und um die Wirkung von Eingriffen in das System abschätzen und bewerten zu können.

In dieser Arbeit wird ein Modell zur Verkehrsnachfrage einer Großstadt an einem Werktag entwickelt. Das Verkehrsgeschehen ist das Ergebnis der vielen Einzelentscheidungen, welche die vielen Verkehrsteilnehmer in Bezug auf die Zeiten, die Ziele und die Verkehrsmittel ihrer Wege treffen. Es gibt verschiedene Ansätze, Verkehrsnachfrage in Modellen abzubilden. Eine grundlegende Unterscheidung ist die räumliche und die zeitliche Skala. Sie reicht von der Betrachtung des Fahrtenaufkommens und der Ziele in Bezug auf Zonen oder Verkehrszellen bis zur Modellierung der Reaktion einzelner Personen auf unvorhergesehene Ereignisse in ihrem Tagesablauf.

Für das Modell dieser Arbeit wird eine sogenannte mikroskopische Betrachtungsweise gewählt, bei der man sich an den Wegen von Einzelpersonen orientiert. Außerdem wird die Verkehrsnachfrage als abgeleitete Nachfrage aufgefaßt: Wege finden statt, um Aktivitäten an verschiedenen Orten auszuüben. Ausgangspunkt ist daher die Zeitverwendung der Menschen. Aus ihr ergibt sich, wann und zu welchem Zweck Wege stattfinden. Für diese Wege sind dann Ziele, sogenannte Gelegenheiten, für die Ausübung von Aktivitäten und Verkehrsmittel zu bestimmen.

Jeder Modellschritt orientiert sich dabei an den Randbedingungen, durch welche die Menge der Alternativen oder der Kombination von Alternativen eingeschränkt wird. In

Bezug auf die Zeitverwendung ergeben sich diese Bedingungen aus den typischen Aktivitäten, die Menschen je nach Alter, Geschlecht und beruflicher Tätigkeit ausüben. Die Tagebuchdaten einer Zeitbudgetstudie werden aufgrund ihrer wechselseitigen Ähnlichkeit mit Hilfe eines Clusterverfahrens klassifiziert. Die gewonnenen Klassen werden zu den soziodemographischen Merkmalen der Personen in Beziehung gesetzt, und entsprechend dieser Merkmale wird in der Simulation jeder Person ein Zeitverwendungsmuster zugeordnet. Die Wahl der Orte für die außerhäusigen Aktivitäten richtet sich nach den Reisezeiten, denn diese müssen mit dem Zeitverwendungsmuster vereinbar sein. Die Reisezeiten ergeben sich aus den zur Verfügung stehenden Verkehrsmitteln und der Verkehrssituation. Die Festlegung des Verkehrsmittels wird durch die Verfügbarkeit von Pkw im Haushalt, von der zurückzulegenden Strecke und gegebenenfalls vom Alter der Person und dem Wegezweck bestimmt. Wenn individuelle Verkehrsmittel genutzt werden, werden sie für alle Wege einer Tour genutzt.

Die Anwendungsmöglichkeiten des Modells werden am Beispiel der Stadt Köln untersucht. Der Parameter der Zielwahl wird anhand von Daten aus einer Befragung zum Verkehrsverhalten kalibriert, wobei die Wege nach Aktivität, sowie nach Alter und Geschlecht der Person unterschieden werden. Das Modell liefert unter anderem Startzeitpunkt, Ausgangspunkt und Ziel der Wege, die mit dem Pkw zurückgelegt werden. Anhand dieser Daten wird eine Verkehrsfluß-Simulation und Routensuche für das Straßennetz durchgeführt, und die so erhaltenen Reisezeiten werden wiederum für die Simulation der Verkehrsnachfrage verwendet, bis ein konsistenter Zustand erreicht ist, in dem sich Nachfrage und Netzbelastung entsprechen. Das zur Verkehrsfluß-Simulation verwendete Programm ist nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Der zeitliche Verlauf des Verkehrsaufkommens wird mit Daten verglichen, die von Dritten mit Hilfe eines zonenbasierten Verfahrens gewonnen wurden. Außerdem werden die Verteilungen von Wegelängen und Wegedauern den entsprechenden Daten aus Erhebungen zum Mobilitätsverhalten gegenübergestellt. Eine kartographische Darstellung zeigt die mittlere Wegedauer und Wegelänge für verschiedene Stadtteile. Die Reaktion des Modells auf Veränderungen im Straßennetz wird am Beispiel einer Brückensperrung untersucht.

# **Anhang A**

## **Kodierung von Aktivitäten**

Für den Vergleich von Tagebuchdaten wird eine grobere Einteilung der Aktivitäten verwendet, als die in der Zeitbudgeterhebung vorgebene [38]. Die Tabelle zeigt die Zuordnung.

Code ZBE	Beschreibung	Code TAPAS	Beschreibung
011	Zubereitung von Mahlzeiten	10	Hauswirtschaft
012	Tisch decken	10	
013	Geschirreinigung	10	
014	Konservierung von Lebensmitteln	10	
015	Lebensmittel einräumen	10	
019	Nicht genau zuteilbar	10	
021	Pflege und Reinigung von Textilien	10	
022	Herstellung und Reparatur von Textilien	10	
029	Nicht genau zuteilbar	10	
031	Pflege und Reinigung innerhalb der Wohnung	10	
032	Pflege und Reinigung außerhalb der Wohnung	10	
039	nicht genau zuteilbar im Bereich Pflege von Haus und Wohnung	10	
041	Zier- und Nutzpflanzenpflege	10	
042	Zierpflanzenpflege	10	
043	Nutzpflanzenpflege	10	
044	Haus- und Nutztierpflege	10	
045	Haustierpflege	10	
046	Nutztierpflege	10	
049	Nicht genau zuteilbar im Bereich Pflanzen und Tierpflege	10	
050	Einkäufe für hauswirtschaftl. Bereich	50	Einkäufe



Fortsetzung ...

Code ZBE	Beschreibung	Code TAPAS	Beschreibung
061	Planung und Organisation von eigenen Leistungen des Haushalts	10	Hauswirtschaft
062	Inanspruchnahme von Fremdleistungen im Bereich Planung/Organisation	10	
063	Reisevorbereitungen	10	
069	Nicht genau zuteilbar im Bereich Behördengänge	10	
070	Rüstzeiten für hauswirtschaftliche Tätigkeiten	10	
081	Wege für hauswirtschaftliche Angelegenheiten zu Fuß	80	
082	mit dem Fahrrad	80	
083	mit dem Kraftrad	80	
084	mit dem Auto	80	
085	mit öffentlichen Verkehrsmitteln	80	
086	Wege mit anderen Verkehrsmitteln	80	Wege
087	Wege ohne Angabe des Verkehrsmittels	80	
091	Wege für organisatorische und dispositive Dinge des Haushalts zu Fuß	80	
092	mit dem Fahrrad	80	
093	mit dem Kraftrad	80	
094	mit dem Auto	80	
095	mit öffentlichen Verkehrsmitteln	80	
096	Wege mit anderen Verkehrsmitteln	80	
097	Wege ohne Angabe des Verkehrsmittels	80	
099	Sonst. nicht zuteilbare Tätigkeiten	10	aktive Freizeit/ Arbeit zuhause
110	Fahrzeugreparatur und -pflege	299	
121	Reparaturen und Herstellung von Gebrauchsgütern für den Haushalt	299	
122	Reparaturen und Herstellung von Gebrauchsgütern für Freizeitaktivitäten	299	
123	Reparaturen und Herstellung von Möbeln	299	
124	Kunsth Handwerk	299	
125	von sonstigen Gebrauchsgütern	299	
129	Nicht genau zuteilbar im Bereich Reparaturen und Herstellung von Gebrauchsgütern	299	

Fortsetzung ...

Code ZBE	Beschreibung	Code TAPAS	Beschreibung
131	Hausbau	299	Aktive Freizeit/ Arbeit zuhause
132	An- und Umbau	299	
133	Ausbau und Renovieren	299	
139	Nicht genau zuteilbar im Bereich Bauen und Renovieren	299	
140	Sonstige Arbeiten im handwerklichen Bereich	299	
150	Einkäufe für den handwerklichen Bereich	50	Einkäufe
161	Planung und Organisation von eigenen Leistungen	299	
162	Inanspruchnahme von Fremdleistungen im Bereich Handwerk	299	
169	Nicht genau zuteilbar	299	
170	Rüstzeiten für handwerklichen Bereich	299	
181	Wege für den handwerklichen Bereich zu Fuß	80	Wege
182	mit dem Fahrrad	80	
183	mit dem Kraftrad	80	
184	mit dem Auto	80	
185	mit öffentlichen Verkehrsmitteln	80	
186	Wege mit anderen Verkehrsmitteln	80	
187	Wege ohne Angabe des Verkehrsmittels	80	
191	Wege für den handwerklichen Bereich für Planung und Organisation zu Fuß	80	
192	mit dem Fahrrad	80	
193	mit dem Kraftrad	80	
194	mit dem Auto	80	
195	mit öffentlichen Verkehrsmitteln	80	
196	Wege mit anderen Verkehrsmitteln	80	
197	Wege ohne Angabe des Verkehrsmittels	80	
199	Sonstige nicht zuteilbare Tätigkeiten im Bereich handwerkliche Tätigkeiten	299	

Fortsetzung ...

Code ZBE	Beschreibung	Code TAPAS	Beschreibung
211	Zeit am Arbeitsplatz, Dienstreise, -gang	211	Erwerbsarbeit
212	Praktikum	211	
213	Interne Fort- und Weiterbildung (während d. Arbeitszeit)	211	
219	Nicht genau zuteilbar	211	
220	Zweite Erwerbstätigkeit/ Nebenerwerbstätigkeit	211	
231	Direkte Gespräche/Kontakte für eigenen Erwerbsbereich	299	Aktive Freizeit/ Arbeit zuhause
232	Telefonate für eigenen Erwerbsbereich	299	
233	zu Hause für eigenen Beruf (von abhängig Erwerbstätigen)	299	
234	von mithelfenden Familienangehörigen	299	
235	für die Erwerbstätigkeit/Qualifikation anderer Haushaltsmit.	299	
239	Nicht genau zuteilbar im Bereich unbezahlte Arbeiten zu Hause	299	
240	Arbeitssuche	299	
250	Mittagpause ohne weitere Angaben	211	
270	Rüstzeiten für Erwerbstätigkeit/ Arbeitssuche	299	
281	Wege zu Fuß für die Erwerbstätigkeit/Arbeitssuche	80	Wege
282	mit dem Fahrrad	80	
283	mit dem Kraftrad	80	
284	mit dem Auto	80	
285	mit öffentlichen Verkehrsmitteln	80	
286	Wege mit anderen Verkehrsmitteln	80	
287	Wege ohne Angabe des Verkehrsmittels	80	
291	Fahrdienste für Erwerbstätige zu Fuß	80	
292	mit dem Fahrrad	80	
293	mit dem Kraftrad	80	
294	mit dem Auto	80	
295	mit öffentlichen Verkehrsmitteln	80	
296	Wege mit anderen Verkehrsmitteln	80	
297	Wege ohne Angabe des Verkehrsmittels	80	
299	Sonst. nicht zuteilbare Tätigkeiten	299	

Fortsetzung ...

Code ZBE	Beschreibung	Code TAPAS	Beschreibung
310	Ehrenamtliche Funktionen und Aufgaben	720	aktive Freizeit außer Haus/Ehrenamt
321	von Personen bei Wohlfahrtsverbänden	720	
322	von Pers. bei kirchl. und weltansch. Organisationen	720	
323	von Pers. bei Selbsthilfeorg./-gruppen	720	
329	Nicht genau zuteilbar	720	
370	Rüstzeiten für Ehrenamt/soz. Hilfeleistungen	720	
381	Wege zu Fuß für ehrenamtliche Tätigkeiten	80	
382	mit dem Fahrrad	80	Wege
383	mit dem Kraftrad	80	
384	mit dem Auto	80	
385	mit öffentlichen Verkehrsmitteln	80	
386	Wege mit anderen Verkehrsmitteln	80	
387	Wege ohne Angabe des Verkehrsmittels	80	
399	Sonstige nicht zuteilbare Tätigkeiten	720	
410	Schule/Studium	410	Schule
420	Fort- und Weiterbildung für Berufstät. (außerh. d. Arbeitszeit)	211	
430	Qualifikation für Haushalt und Familie	211	
440	Qualifikation aus persoenl. Gründen	211	
450	Mittagspause von Schülern und Studenten ohne weitere Angaben	410	
470	Rüstzeiten für Qualifikation und Bildung	410	
481	Wege zu Fuß	80	
482	mit dem Fahrrad	80	
483	mit dem Kraftrad	80	
484	mit dem Auto	80	
485	mit öffentlichen Verkehrsmitteln	80	
486	Wege mit anderen Verkehrsmitteln	80	
487	Wege ohne Angabe des Verkehrsmittels	80	
499	Sonstige nicht zuteilbare Tätigkeiten	410	

Fortsetzung ...

Code ZBE	Beschreibung	Code TAPAS	Beschreibung
511	Schlafen	511	Schlafen
512	Ausruhen/Nichtstun	700	Freizeit zuhause
519	Nicht genau zuteilbar	700	
521	Allgemeine Körperpflege	700	
522	Persoenliche Angelegenheiten	720	aktive Freizeit
529	Nicht genau zuteilbar	700	
531	Essen zu Hause	531	Essen zuhause
532	Essen im Restaurant	720	
533	Essen in der Kantine	211	Arbeit
539	Essen, sonstiges	720	
570	Rüstzeiten für pers. Bereich/physiol. Regeneration	700	
581	Wege zu Fuß für den persönlichen Bereich/ physiologische Regeneration	80	Wege
582	mit dem Fahrrad	80	
583	mit dem Kraftrad	80	
584	mit dem Auto	80	
585	mit oeffentlichen Verkehrsmitteln	80	
586	Wege mit anderen Verkehrsmitteln	80	
587	Wege ohne Angabe des Verkehrsmittels	80	
599	Sonstige nicht zuteilbare Tätigkeiten im Bereich Regeneration	700	

Fortsetzung ...

Code ZBE	Beschreibung	Code TAPAS	Beschreibung
611	Gespräche persönlichen Inhalts	700	
619	Nicht genau zuteilbare Gespräche	700	
621	Telefonate persönlichen Inhalts	700	
629	Nicht genau zuteilbare Telefonate	700	
631	zu Besuch/Besuch empfangen	700	
632	Familienfestlichkeiten	720	
633	Ausgehen	720	
639	Nicht genau zuteilbare Tätigkeiten im Bereich Kontakte/Geselligkeit	700	
640	Ausflüge	720	
670	Rüstzeiten für Kontakte/ Ge- spr./Gesellig.	700	
681	Wege zu Fuß für Kontakte/Geselligkeit	80	
682	mit dem Fahrrad	80	
683	mit dem Kraftrad	80	
684	mit dem Auto	80	
685	mit öffentlichen Verkehrsmitteln	80	
686	Wege mit anderen Verkehrsmitteln	80	
687	Wege ohne Angabe des Verkehrsmittels	80	
699	Sonstige nicht zuteilbare Tätigkeiten	700	
711	Fernsehen/Video	711	Fernsehen
712	Radio hören	700	Freizeit zuhause
713	Musik hören (Platte, CD, Kassette)	700	
714	Bücher lesen	700	
715	Tageszeitungen lesen	700	
716	Zeitschriften lesen	700	
717	Sonstiges Lesen	700	
718	Tätigkeiten am Computer	700	
719	Nicht genau zuteilbar	700	
721	Sport	720	aktive Freizeit außer Haus/Ehrenamt
722	Spaziergehen	720	
723	Spielen	700	
724	Besuch von Freizeitveranstaltungen	720	
729	Nicht genau zuteilbar	700	

Fortsetzung ...

Code ZBE	Beschreibung	Code TAPAS	Beschreibung
731	Musizieren	700	Wege
732	Besuch von pol./relig./kult./sportl. Veranstaltungen	720	
733	Besuch von Ausstellungen/ Museen/Theater/Kino/Kabarett	720	
739	Nicht genau zuteilbar	700	
740	Sonstige Freizeitaktivitäten	700	
770	Rüstzeiten für Mediennutz./ Freizeitaktivitäten	700	
781	Wege zu Fuß für Freizeitaktivitäten	80	
782	mit dem Fahrrad	80	
783	mit dem Kraftrad	80	
784	mit dem Auto	80	
785	mit öffentlichen Verkehrsmitteln	80	
786	Wege mit anderen Verkehrsmitteln	80	
787	Wege ohne Angabe des Verkehrsmittels	80	
799	Sonstige nicht zuteilbare Tätigkeiten	700	Betreuung
811	Lernen mit Kindern	800	
812	Spielen/Sport/Spaziergehen mit Kindern	800	
813	im kurzfristigen Krankheitsfall	800	
819	Sonstige Kinderbetreuung	800	
821	im kurzfristigen Krankheitsfall	800	
822	von längerfristig Pflegebedürftigen	800	
823	Sonstige Betreuung von Personen	800	
824	dauernd pflegebedürftigen Kindern	800	
829	Sonstige Pflege und Betreuung	800	

Fortsetzung ...

Code ZBE	Beschreibung	Code TAPAS	Beschreibung
870	Rüstzeiten für Kinderbetreuung	800	Wege
875	Rüstzeiten für Erwachs.-/Jugendl.- Betreuung	800	
881	Wege für die Betreuung von Kindern zu Fuß	80	
882	mit dem Fahrrad	80	
883	mit dem Kraftrad	80	
884	mit dem Auto	80	
885	mit öffentlichen Verkehrsmitteln	80	
886	Wege mit anderen Verkehrsmitteln	80	
887	Wege ohne Angabe des Verkehrsmittels	80	
891	Wege zu Fuß für die Betreuung von Ju- gendlichen und Erwachsenen	80	
892	mit dem Fahrrad	80	
893	mit dem Kraftrad	80	
894	mit dem Auto	80	
895	mit öffentlichen Verkehrsmitteln	80	
896	Wege mit anderen Verkehrsmitteln	80	
897	Wege ohne Angabe des Verkehrsmittels	80	
899	Sonstige nicht zuteilbare Tätigkeiten	800	
910	Tagebucheintragungen	700	Feizeit zuhause
920	Fehlende Eintragungen	700	
970	Nicht zuteilbare Rüstzeiten	700	
981	Wege zu Fuß	80	
982	mit dem Fahrrad	80	
983	mit dem Kraftrad	80	
984	mit dem Auto	80	
985	mit öffentlichen Verkehrsmitteln	80	
986	Wege mit anderen Verkehrsmitteln	80	
987	Wege ohne Angabe des Verkehrsmittels	80	
999	Sonstige nicht zuteilbare Tätigkeiten	700	



## **Anhang B**

# **Personengruppen in den Kölner Stadtteilen**

Die Bezeichnung der Personengruppen finden sich in Tabelle 2.7 auf Seite 82

Nummer	Bezirk	RF	RM	JS	PP	EM
101	ALTSTADT-SUED	9.3	4.8	2.5	18.4	24.9
102	NEUSTADT-SUED	5.8	3.0	2.3	18.9	26.1
103	ALTSTADT-NORD	8.3	5.2	3.9	18.4	25.4
104	NEUSTADT-NORD	7.0	3.9	2.6	18.0	25.4
105	DEUTZ	9.8	5.1	2.6	18.6	25.1
201	BAYENTHAL	9.1	5.0	2.4	16.2	25.7
202	MARIENBURG	8.7	5.1	2.6	19.1	23.1
203	RADERBERG	9.6	5.9	3.9	22.2	24.5
204	RADERTHAL	11.1	7.1	2.2	21.2	23.6
205	ZOLLSTOCK	11.4	6.2	2.6	18.8	24.9
206	RONDORF	5.8	3.8	1.2	23.1	28.4
207	HAHNWALD	7.3	6.0	3.1	17.7	17.7
208	RODENKIRCHEN	12.1	5.6	1.6	16.5	21.8
209	WEISS	7.8	4.7	1.4	21.2	24.1
210	SUERTH	8.5	4.6	1.4	19.4	26.1
211	GODORF	6.1	5.3	1.4	26.6	23.3
212	IMMENDORF	6.0	3.7	1.0	27.2	24.8
213	MESCHENICH	4.8	4.0	2.1	27.3	30.6

Fortsetzung ...

Nummer	Bezirk	EF42	EF92	HW42	HW92	FL	gesamt
101	ALTSTADT-SUED	15.1	9.0	2.6	3.2	10.2	28798
102	NEUSTADT-SUED	17.2	8.0	2.5	2.2	13.9	39904
103	ALTSTADT-NORD	13.6	7.3	3.5	3.3	11.1	18946
104	NEUSTADT-NORD	15.7	8.9	2.4	2.7	13.5	30723
105	DEUTZ	14.5	9.4	2.7	3.6	8.7	17154
201	BAYENTHAL	15.3	11.6	2.1	3.0	9.6	7351
202	MARIENBURG	12.5	10.5	2.1	3.2	13.2	5643
203	RADERBERG	13.5	8.5	3.3	3.9	4.8	4852
204	RADERTHAL	12.1	11.8	1.7	3.3	5.9	4632
205	ZOLLSTOCK	14.4	9.9	2.5	3.9	5.5	20304
206	RONDORF	15.4	14.2	0.9	1.8	5.4	9277
207	HAHNWALD	8.5	9.4	3.4	3.5	23.5	2102
208	RODENKIRCHEN	12.7	11.8	1.5	3.1	13.3	16199
209	WEISS	13.2	13.2	1.4	2.9	10.1	5882
210	SUERTH	15.1	12.5	1.5	2.6	8.2	7875
211	GODORF	12.0	10.6	1.2	2.8	10.7	2471
212	IMMENDORF	13.7	13.1	0.7	1.4	8.5	2067
213	MESCHENICH	13.3	9.3	1.7	2.4	4.5	7945

Fortsetzung ...

Nummer	Bezirk	RF	RM	JS	PP	EM
301	KLETTENBERG	11.3	3.5	1.0	15.2	25.7
302	SUELZ	8.4	3.9	2.2	17.4	25.5
303	LINDENTHAL	10.1	4.2	1.8	16.5	23.5
304	BRAUNSFELD	10.7	4.8	2.3	16.8	21.2
305	MUENGERSDORF	10.3	4.4	1.8	18.7	21.1
306	JUNKERSDORF	7.6	4.3	1.9	17.8	25.0
307	WEIDEN	8.9	5.5	2.0	19.4	23.8
308	LOEVENICH	7.8	5.1	1.7	19.2	25.9
309	WIDDERSDORF	7.9	5.8	2.5	26.9	20.9
401	EHRENFELD	6.9	4.5	3.1	23.0	26.4
402	NEUEHRENFELD	8.8	4.5	1.7	19.5	26.9
403	BICKENDORF	7.1	5.5	2.6	27.2	24.5
404	VOGELSANG	10.0	6.9	2.2	22.3	24.2
405	BOCKLEMUND,MENGENICH	10.4	6.1	2.7	25.0	21.8
406	OSSENDORF	7.2	5.1	1.8	23.5	25.1
501	NIPPES	8.0	4.4	2.2	19.2	25.7
502	MAUENHEIM	9.9	5.7	1.4	20.9	29.6
503	RIEHL	14.1	6.5	2.0	17.5	21.1
504	NIEHL	8.7	5.8	2.1	23.1	26.0
505	WEIDENPESCH	8.3	4.4	1.3	22.3	26.9
506	LONGERICH	11.0	6.3	1.5	21.1	24.8
507	BILDERSTOECKCHEN	8.3	6.1	2.6	26.5	22.8
601	MERKENICH	6.3	4.9	2.0	24.0	28.3
602	FUEHLINGEN	4.2	2.5	0.4	19.6	32.3
603	SEEBERG	6.3	5.2	2.4	30.1	23.2
604	HEIMERSDORF	13.8	9.1	2.6	19.7	20.9
605	LINDWEILER	8.6	7.9	4.5	31.0	19.3
606	PESCH	6.8	5.7	2.4	20.1	27.1
607	ESCH, AUWEILER	6.6	5.6	2.4	28.1	25.0
608	VOLKHOVEN, WEILER	2.2	1.2	0.7	29.5	28.9
609	CHORWEILER	7.2	3.4	1.9	32.9	24.9
610	BLUMENBERG	0.5	0.3	0.2	26.1	33.2
611	ROGGENDORF,THENHOVEN	5.5	3.8	2.1	28.7	27.1
612	WORRINGEN	9.0	6.1	1.6	20.6	28.3

Fortsetzung ...

Nummer	Bezirk	EF42	EF92	HW42	HW92	FL	gesamt
301	KLETTENBERG	16.6	12.8	0.9	2.1	10.8	11143
302	SUELZ	17.7	9.3	2.3	2.5	10.8	37236
303	LINDENTHAL	17.6	10.5	2.1	2.5	11.2	29912
304	BRAUNSFELD	15.3	9.8	2.2	3.2	13.9	11460
305	MUENGERSDORF	12.9	10.2	1.5	2.8	16.3	8210
306	JUNKERSDORF	15.5	11.3	1.6	2.6	12.3	10830
307	WEIDEN	13.4	12.3	2.0	3.5	9.2	16021
308	LOEVENICH	13.5	13.8	1.4	2.5	9.1	8332
309	WIDDERSDORF	10.4	10.5	2.4	3.8	8.7	5514
401	EHRENFELD	15.2	7.7	3.1	3.0	7.0	33149
402	NEUEHRENFELD	16.3	10.8	1.6	2.5	7.4	21372
403	BICKENDORF	12.4	8.5	2.3	3.4	6.4	15836
404	VOGELSANG	11.5	11.8	1.4	3.4	6.4	7416
405	BOCKLEMUND,MENGENICH	11.3	9.7	2.6	4.4	6.1	11200
406	OSSENDORF	14.2	11.3	1.5	2.8	7.5	5769
501	NIPPES	15.7	10.0	2.2	3.0	9.6	31292
502	MAUENHEIM	14.9	12.7	1.3	2.8	0.8	6145
503	RIEHL	11.7	10.9	1.6	4.0	10.5	11554
504	NIEHL	12.9	11.2	1.7	3.2	5.3	18043
505	WEIDENPESCH	15.3	11.9	1.4	2.5	5.7	13852
506	LONGERICH	12.1	12.6	1.1	2.8	6.8	13908
507	BILDERSTOECKCHEN	11.8	9.3	2.6	4.4	5.6	13722
601	MERKENICH	14.0	11.7	1.5	2.7	4.6	5282
602	FUEHLINGEN	16.7	14.0	0.6	1.2	8.6	1807
603	SEEBERG	11.6	10.6	2.4	3.9	4.3	11575
604	HEIMERSDORF	9.8	10.9	1.8	4.9	6.5	6230
605	LINDWEILER	8.3	8.3	3.2	5.8	3.1	3840
606	PESCH	12.0	14.6	1.6	3.9	5.8	8374
607	ESCH, AUWEILER	12.1	11.3	2.2	3.6	3.1	6450
608	VOLKHOVEN, WEILER	20.6	10.5	0.6	0.7	5.1	5528
609	CHORWEILER	13.0	10.4	1.8	3.0	1.6	14529
610	BLUMENBERG	26.8	8.1	0.3	0.3	4.2	4380
611	ROGGENDORF,THENHOVEN	13.9	10.6	1.8	3.2	3.3	3963
612	WORRINGEN	13.2	12.6	1.3	3.1	4.2	9441

Fortsetzung ...

Nummer	Bezirk	RF	RM	JS	PP	EM
701	POLL	8.3	5.6	1.9	22.6	26.2
702	WESTHOVEN	7.4	4.7	2.2	21.2	29.0
703	ENSEN	8.3	6.4	1.3	17.9	30.8
704	GREMBERGHOVEN	9.7	9.3	3.5	25.1	26.2
705	EIL	6.8	4.0	1.3	19.8	28.9
706	PORZ	8.7	4.8	2.6	25.7	25.5
707	URBACH	9.2	6.3	2.5	22.1	26.0
708	ELSDORF	11.9	4.4	0.8	13.3	33.1
709	GRENGEL	7.9	6.5	2.7	21.1	28.7
710	WAHNHEIDE	5.2	2.8	0.6	17.9	34.0
711	WAHN	6.7	3.5	0.7	21.6	28.7
712	LIND	4.8	3.4	1.6	19.3	32.7
713	LIBUR	3.2	1.9	0.3	19.1	37.6
714	ZUENDORF	5.9	3.9	1.6	22.0	31.2
715	LANGEL	5.8	4.3	1.9	24.5	27.0
801	HUMBOLDT-GREMBERG	9.3	7.0	3.9	26.2	25.3
802	KALK	7.9	4.7	2.9	26.6	26.7
803	VINGST	10.4	6.6	3.4	30.0	21.5
804	HOEHENBERG	10.0	5.0	2.3	20.1	25.4
805	OSTHEIM	8.6	5.3	2.1	28.1	21.8
806	MERHEIM	8.4	5.2	2.4	22.0	25.6
807	BRUECK	10.9	5.8	2.0	18.9	23.5
808	RATH, HEUMAR	9.8	6.2	1.6	20.0	24.6
809	NEUBRUECK	11.6	7.7	3.0	28.3	20.9
901	MUELHEIM	8.7	5.5	2.7	25.4	24.9
902	BUCHFORST	11.9	6.5	2.9	23.5	26.1
903	BUCHHEIM	8.9	5.7	2.8	24.1	25.7
904	HOLWEIDE	7.1	4.5	1.6	23.6	25.6
905	DELLBRUECK	9.9	5.4	1.7	21.6	25.3
906	HOEHENHAUS	10.2	7.2	2.3	25.7	22.7
907	DUENNWALD	8.6	5.6	2.0	26.5	25.6
908	STAMMHEIM	9.8	7.0	3.2	23.9	24.1
909	FLITTARD	11.8	8.3	2.8	20.8	23.4

Fortsetzung ...

Nummer	Bezirk	EF42	EF92	HW42	HW92	FL	gesamt
701	POLL	13.7	11.7	1.5	3.0	5.5	11235
702	WESTHOVEN	13.1	13.0	1.4	2.9	5.1	4943
703	ENSEN	14.9	14.1	1.2	2.5	2.5	6346
704	GREMBERGHOVEN	9.9	7.5	3.1	5.6	0.0	2975
705	EIL	15.1	14.0	1.0	2.2	6.9	8879
706	PORZ	13.3	10.2	2.2	3.4	3.6	20219
707	URBACH	13.1	12.6	1.8	3.8	2.6	11986
708	ELSDORF	16.4	17.1	0.8	2.3	0.0	1198
709	GRENGEL	13.0	12.4	1.8	3.6	2.3	5549
710	WAHNHEIDE	17.4	14.6	0.5	1.3	5.6	7814
711	WAHN	15.5	14.3	0.9	1.9	6.3	5313
712	LIND	16.5	13.9	0.9	2.0	5.0	3517
713	LIBUR	18.6	18.6	0.4	0.3	0.0	742
714	ZUENDORF	14.8	13.3	0.9	2.1	4.2	11616
715	LANGEL	13.7	12.6	1.6	2.5	6.0	3255
801	HUMBOLDT-GREMBERG	11.1	7.5	3.4	4.7	1.5	14701
802	KALK	12.4	8.0	2.9	3.4	4.3	20380
803	VINGST	10.0	8.0	2.7	4.7	2.8	11854
804	HOEHENBERG	14.7	10.0	2.3	3.7	6.5	13058
805	OSTHEIM	11.1	9.1	2.2	3.7	7.9	10549
806	MERHEIM	13.2	11.6	1.8	3.6	6.2	7474
807	BRUECK	13.6	12.2	1.5	3.2	8.4	9681
808	RATH, HEUMAR	12.6	12.1	1.5	3.2	8.4	10896
809	NEUBRUECK	9.4	9.7	2.5	5.1	1.8	9074
901	MUELHEIM	12.6	8.5	2.4	3.5	5.7	40316
902	BUCHFORST	12.1	9.5	2.4	4.4	0.7	7071
903	BUCHHEIM	12.8	9.4	2.5	3.8	4.2	12290
904	HOLWEIDE	15.0	11.0	1.5	2.5	7.5	19581
905	DELLBRUECK	13.7	12.0	1.5	3.2	5.7	20301
906	HOEHENHAUS	10.6	10.6	1.9	3.8	5.0	15026
907	DUENNWALD	13.6	10.3	1.4	3.1	3.4	11238
908	STAMMHEIM	10.7	10.0	2.5	4.5	4.3	8190
909	FLITTARD	10.5	9.7	2.2	4.7	5.9	8225





# Literaturverzeichnis

- [1] ALLAIS, MAURICE: *Fondements d'une théorie positive des choix comportant un risque et critique des postulats et axiomes de l'école américaine*. Économetrie, 40:257–332, 1953. Zitiert nach [65].
- [2] ARENTZE, THEO and HARRY TIMMERMANS: *Albatross — A Learning Based Transportations Oriented Simulations System*. EIRASS, European Institute of Retailing and Services Studies, Technische Universiteit Eindhoven, 2000.
- [3] BACKHAUS, KLAUS, BERND ERICHSON, WULFF PLINKE und ROLF WEIBER: *Multivariate Analysemethoden*. Springer, Berlin, Neunte Auflage, 2000.
- [4] BAGLEY, MICHAEL N. and PATRICIA L. MOKHTARIAN: *The role of lifestyle and attitudinal characteristics in residential neighborhood choice*. In CEDER, A. (editor): *Transportation and Traffic Theory*, pages 735–758. Pergamon, 1999.
- [5] BECKMAN, R. J., K. A. BAGGERLY, and M. D. MCKAY: *Creating synthetic baseline populations*. Transportation Research Part A, 30(6):415–429, 1996.
- [6] BECKMANN, KLAUS JÜRGEN: *SimVV, Mobilität verstehen und lenken — zu einer integrierten quantitativen Gesamt- und Mikrosimulation von Verkehr*. Abschlußbericht, Ministerium für Schule, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (MSWF), Düsseldorf, 2002.
- [7] BHAT, CHANDRA R.: *A Model of Post Home-Arrival Activity Participation Behavior*. Transportation Research Part B, 32(6):387–400, 1998.
- [8] BLANKE, KAREN, MANFRED EHLING und NORBERT SCHWARZ: *Zeit im Blickfeld : Ergebnisse einer repräsentativen Zeitbudgeterhebung*, Band 121 der Reihe *Schriftenreihe des Bundesministeriums für Familie, Senioren, Frauen und Jugend*. Kohlhammer, Stuttgart, 1996.

- [9] BOWMAN, J. L. and M. E. BEN-AKIVA: *Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules*. Transportation Research Part A, 35:1–28, 2001.
- [10] BRÜGGEMANN, ULRIKE: *Tagespläne*. In: *SimVV, Mobilität verstehen und lenken — zu einer integrierten quantitativen Gesamtsicht und Mikrosimulation von Verkehr* [6].
- [11] BRÜGGEMANN, ULRIKE, STEFAN KRÖPEL und HARRY LEHMANN: *Das Verkehrsnachfragemodell AVENA und seine Anwendung*. Internationales Verkehrswesen, 55(3):86–90, März 2003.
- [12] BUNDESAMT FÜR BAUWESEN UND RAUMORDNUNG: *Siedlungsstrukturelle Regions-, Kreis- und Gemeindetypen*. <http://www.bbr.bund.de>. Abgerufen am 28.04.2004.
- [13] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU- UND WOHNUNGSWESEN: *Mobilität in Deutschland 2002 — Kontinuierliche Erhebung zum Verkehrsverhalten*. Endbericht 70.0681/2001, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen der Bundesrepublik, Berlin, Juni 2003.
- [14] CAIRNS, SALLY, STEPHEN ATKINS und PHIL GOODWIN: *Disappearing traffic? The story so far*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Municipal Engineer, 151(1):13–22, 2002.
- [15] CHLOND, BASTIAN und TOBIAS KUHNIMHOF: *Das Panelhandbuch — Informationen über, Anleitung zum Gebrauch und Anregungen zur Nutzung der Daten des deutschen Mobilitätspanels*. <http://mobilitaetspanel.ifv.uni-karlsruhe.de/wissenschaft/indexwissenschaft.htm>. Abruf am 12.01.2004.
- [16] CLEARINGSTELLE FÜR VERKEHRSDATEN UND -MODELLE: *KONTIV/Mobilität in Deutschland*. <http://www.clearingstelle-verkehr.de>. Abruf: 31. März 2004.
- [17] DEMING, W. E. und F. F. STEPHAN: *On a least squares adjustment of a sampled frequency table when the expected marginal totals are known*. The Annals of Mathematical Statistics, 11:427–444, 1940.
- [18] DOHERTY, S. T. and K. W. AXHAUSEN: *The development of a unified modelling framework for the household activity-travel scheduling*. In BRILON, W., F. HU-

- BER, M. SCHRECKENGERG, and H. WALLENTOWITZ (editors): *Traffic and Mobility: Simulation-Economics-Environment*, pages 35–56. Springer, Berlin, 1999.
- [19] DOHERTY, SEAN T. and E. J. MILLER: *A computerized household activity scheduling survey*. *Transportation*, 27(1):75–97, 2000.
- [20] DÖRNER, D. und H. SCHAUB: *Das Leben von  $\Psi$ . Über das Zusammenspiel von Kognition, Emotion und Motivation – oder: Eine einfache Theorie für komplizierte Verhaltensweisen*. Memorandum 27, Institut für Theoretische Psychologie an der Otto-Friedrich-Universität Bamberg, Bamberg, 1998. Zitiert in [10].
- [21] EHLING, MANFRED und WOLF BIHLER: *Zeit im Blickfeld. Ergebnisse einer repräsentativen Zeitbudgeterhebung*. In: *Zeit im Blickfeld: Ergebnisse einer repräsentativen Zeitbudgeterhebung* [8], Kapitel 11, Seiten 237–274.
- [22] EISSFELDT, NILS: *Vehicle-based modelling of traffic — Theory and application to environmental impact modelling*. Doktorarbeit, Universität zu Köln, 2004.
- [23] EISSFELDT, NILS und JÜRGEN GRÄFE: *Verkehr*. In: *SimVV, Mobilität verstehen und lenken — zu einer integrierten quantitativen Gesamtsicht und Mikrosimulation von Verkehr* [6].
- [24] ETTEMA, DICK und HARRY TIMMERMANS: *Activity Based Approaches to Travel Demand Analysis*. Elsevier, Oxford, 1997.
- [25] FLADE, ANTJE (Herausgeber): *Mobilitätsverhalten*. Beltz, Psychologie-Verlags-Union, Weinheim, 1994.
- [26] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (Herausgeber): *Tagungsbericht HEUREKA 02*, Köln, März 2002.
- [27] GÄCHTER, SIMON: *Mit Sanktionen zur Kooperation — Wie sich soziale Dilemmata überwinden lassen*. *Neue Züricher Zeitung*, 169:21, 24. Juli 2001.
- [28] GALLEZ, CAROLINE, JEAN-PERRE ORFEUIL und ANNARITA POLACCHINI: *L'évolution de la mobilité quotidienne. Croissance ou réduction des disparité*. *Recherche Transport Sécurité*, 56, juillet-septembre 1997.
- [29] GÄRLING, T.: *Acquisition, Representation and Use of Place Knowledge*. In: BECKMANN, K. J. (Herausgeber): *Tagungsband Aachener Kolloquium Mobilität und*

- Stadt*, Band 71 der Reihe *Stadt Region Land*, Seiten 47–52, Aachen, 2001. Institut für Stadtbauwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- [30] GAWRON, CHRISTIAN: *An iterative Algorithm to Determine the Dynamic User Equilibrium in a Traffic Simulation Model*. International Journal of Modern Physics C, 9:393–407, 1998.
- [31] GAWRON, CHRISTIAN: *Simulation-Based Traffic Assignment*. Doktorarbeit, Universität zu Köln, 1998.
- [32] GUO, JESSICA Y. und CHANDRA R. BHAT: *A Comprehensive Countinuous-Time approach to Activity-Based Travel Modeling*. In: *Tagungsband AMUS 2001*, Band 71 der Reihe *Stadt Region Land*, Seiten 79–87. Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr, Aachen, 2001.
- [33] GUSFIELD, DAN: *Algorithms on Strings, Trees and Sequences*, Seiten 215–228. Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- [34] HÄGERSTRAND, TORSTEN: *What about People in Regional Science?* Papers of the Regional Science Association, 24:7–21, 1970.
- [35] HASBERG, PETER: *stadtfoköln: Mobilitätsforschung für den Ballungsraum*. <http://www.stadtfokoeln.de/info>. Abgerufen: 03.05.2004.
- [36] HERTKORN, GEORG: *Synthetische Bevölkerung*. In: *SimVV, Mobilität verstehen und lenken — zu einer integrierten quantitativen Gesamtsicht und Mikrosimulation von Verkehr* [6].
- [37] HERTKORN, GEORG, PETER WAGNER und CLAUDIA HERTFELDER: *Klassifikation von Zeitverwendungstagebüchern*. In: EHLING, MANFRED und JOACHIM MERZ (Herausgeber): *Zeitbudget in Deutschland — Erfahrungsberichte der Wissenschaft*, Band 17 der Reihe *Spektrum Bundesstatistik*, Seiten 78–90. Metzeler-Poeschel, Stuttgart, 2001.
- [38] HOLZ, ERLIND und MANFRED EHLING: *Die Zeitbudgeterhebung als Scientific Use File*. Handbuch, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 1999.
- [39] HOLZ-RAU, CHRISTIAN: *Randwanderung und Verkehr — Ein blinder Fleck in der Verkehrsmodellierung?* In: BECKMANN, KLAUS J. (Herausgeber): *Tagungsband Aachener Kolloquium Mobilität und Stadt*, Band 69 der Reihe *Stadt – Region –*

- Land*, Seiten 205–215, Aachen, 2000. Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.
- [40] HUNECKE, MARCEL und GEBHARD WULFHORST: *Raumstruktur und Lebensstil - wie entsteht Verkehr*. Internationales Verkehrswesen, 12:556–561, Dezember 2000.
- [41] JAIN, ANIL K. and RICHARD C. DUBES: *Algorithms for Clustering Data*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.
- [42] JONES, P. M.: *New approaches to understanding travel behaviour. The human activity approach*. Working Paper 28, Transport Studies Unit, University of Oxford, 1977. Zitiert nach [9].
- [43] KAISER, FLORIAN G., ERWIN SCHREIBER und URS FUHRER: *Mobilität und emotionale Bedeutung des Autos*. In: FLADE, ANTJE [25], Seiten 113–130.
- [44] KASS, G. V.: *An exploratory technique for investigating large quantities of categorical data*. Applied Statistics, 29(2):119–127, 1980.
- [45] KIRSCH, WERNER: *Die Handhabung von Entscheidungsproblemen*. Müncher Schriften zur angewandten Führungslehre. Verlag Barbara Kirsch, Herrsching, 1998.
- [46] KITAMURA, RYUICHI, CYNTHIA CHEN, RAM M. PENDYALA, and RYVI NARAYANAN: *Micro-simulation of daily activity-travel patterns for travel demand forecasting*. Transportation, 27(1):25–51, 2000.
- [47] KITAMURA, RYUICHI et al.: *An application of a micro-simulator of daily travel and dynamic network flow to evaluate the effectiveness of selected tdm measures for CO<sub>2</sub> emissions reduction*. In *Proceedings of Transportation Research Board 77<sup>th</sup> Annual Meeting, Washington, D.C., USA*, 1998.
- [48] KOCH, ANDREAS und PETER MANDL (Herausgeber): *Multi-Agenten-Systeme in der Geographie*, Band 23 der Reihe *Klagenfurter Geographische Schriften*. Institut für Geographie und Regionalforschung der Universität Klagenfurt, 2003.
- [49] KRACHT, MATTHIAS: *Tracking and interviewing individuals with GPS and GSM on mobile electronic devices*. Conference draft paper submitted to the Seventh International Conference on Travel Survey Methods, 2004, Costa Rica, 2004.

- [50] KRUSKAL, JOSEPH B.: *An overview of sequence comparison*. In SANKOFF, DAVID and JOSEPH B. KRUSKAL (editors): *Time Warps, String Edits, and Macromolecules: The Theory and Practice of Sequence Comparison*, chapter one, pages 1–44. Addison-Wesley, Reading, MA, 1983.
- [51] KUTTER, E.: *Demographische Determinanten städtischen Personenverkehrs*. Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen der TU Braunschweig 9, TU Braunschweig, 1972. Zitiert nach [66].
- [52] LIPPS, OLIVER: *Modellierung der individuellen Verhaltensvariationen bei der Verkehrsentstehung*. Dissertation, Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 2001.
- [53] LUNDQVIST, L., L.-G. MATTSSON, and T.J. KIM (editors): *Network Infrastructure and the Urban Environment*. Springer, Berlin/Heidelberg/New York, 1998.
- [54] BIK ASCHPURWIS + BEHRENS GMBH: *BIK-Regionen und Verflechtungsgebiete*. <http://www.bik-gmbh.de/produkte/data/regionen.html>. Abgerufen: 30.04.2004.
- [55] MÜHLHANS, HEIKE: *Computergestützte Erhebung der Wochenplanung und des Verkehrsverhaltens einer ausgewählten Studentengruppe*. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Stadtbauwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, Juli 1999.
- [56] NAGEL, KAI. persönliche Mitteilung, 2001.
- [57] NAGEL, KAI, JÖRG ESSER, and MARCUS RICKERT: *Large-scale traffic simulations for transportation planning*. In STAUFFER, DIETRICH (editor): *Annual Reviews of Computational Physics VII*, pages 151–202. World Scientific Publishing Company, 2000.
- [58] NOBIS, CLAUDIA. persönliche Mitteilung, September 2002.
- [59] ORTÚZAR, JUAN DE DIOS und LUIS G. WILLUMSEN: *Modelling Transport*. John Wiley & Sons, Chichester, 1999.
- [60] PRESS, WILLIAM H., SAUL A. TEUKOLSKY, WILLIAM T. VETTERLING, and BRIAN P. FLANNERY: *Numerical Recipes in C*. Cambridge University Press, second edition, 2002.

- [61] RECKER, W. W.: *The household activity pattern problem: General formulation and solution*. Transportation Research B, 29B(1):61–77, 1995.
- [62] RINDSFÜSER, GUIDO, JENS ANSORGE und HEIKE MÜHLHANS: *Aktivitätenvorhaben*. In: *SimVV Mobilität verstehen und lenken — zu einer integrierten quantitativen Gesamtsicht und Mikrosimulation von Verkehr* [6].
- [63] RUHREN, STEFAN VON DER und HEIKE MÜHLHANS: *Zeitlich feinteilige Verkehrsnachfrageermittlung im Rahmen einer netzweiten Kurzfristprognose von Verkehrszuständen*. In: FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN [26], Seiten 521–535.
- [64] SCHADSCHNEIDER, ANDREAS: *Statistical Physics of Traffic Flow*. Physica A, 285:101–120, 2000.
- [65] SCHMIDT, THOMAS: *Rationale Entscheidungstheorie und reale Personen*. Metropolis-Verlag, Marburg, 1995.
- [66] SCHMIEDEL, REINHARD: *Bestimmung verhaltensähnlicher Personenkreise für die Verkehrsplanung*. Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 1984.
- [67] SCHMITZ, BRITTA: *Warum ist der Mensch mobil?* In: FLADE, ANTJE [25], Seiten 103–112.
- [68] SCHWARTZ, S. H. und W. BILSKY: *Toward a theory of the universal content and structure of values. Extensions and cross-cultural replications*. Journal of Personality and Social Psychology, 58:878–891, 1987. Zitiert in Schmitz [67].
- [69] SIMON, HERBERT A.: *Models of Man*. Wiley, New York, 1957. Zitiert nach [45].
- [70] SPSS: *Answertree algorithm summary*. <http://www.spss.com/downloads>. Abruf am 17.07.2003.
- [71] STADT KÖLN: *Die stadtbezirke*. <http://www.stadt-koeln.de/bezirke/index.html>. Abgerufen: 15.01.2004.
- [72] STEINHAUSEN, DETLEF and KLAUS LANGER: *Clusteranalyse: Einführung in Methoden und Verfahren der automatischen Klassifikation*. de Gruyter, Berlin, 1977.

- [73] STRAUCH, DIRK: *Ein neuer mikroskopisch-dynamischer Modellanasatz für eine integrierte Flächennutzungs- und Verkehrsplanung: Das Simulationsmodell ILU-MASS*. In: KOCH, ANDREAS und PETER MANDL [48], Seiten 123–137.
- [74] TIMMERMANS, H. J. P.: *Models of Activity Scheduling Behaviour*. In: BECKMANN, K. J. (Herausgeber): *Tagungsband Aachener Kolloquium Mobilität und Stadt*, Band 71 der Reihe *Schriftenreihe Stadt Region Land*, Seiten 63–78, Aachen, 2001. Institut für Stadtbauwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- [75] VERPLANKEN, BAS, HANK AARTS und AD VAN KNIPPENBERG: *Habit, information acquisition, and the process of making travel mode choices*. *European Journal of Social Psychology*, 27:539–560, 1997.
- [76] WARDROP, J. G.: *Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research*. In: *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, Band 1, Seiten 325–278, 1952. Zitiert nach [30].
- [77] WIDMER, PAUL und KAY W. AXHAUSEN: *Aktivitäten-orientierte Personenverkehrsmodelle: Vorstudie*. Forschungsauftrag auf Antrag der Vereinigung Schweizer Verkehrsingenieure (SVI) 46/99, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation/Bundesamt für Straßen, Januar 2001.
- [78] WILSON, A. G.: *A Statistical Theory of Spatial Distribution Models*. *Transportation Research*, 1:253–269, 1967.
- [79] WILSON, W. C.: *Activity pattern analysis by means of sequence-alignment methods*. *Environment and Planning A*, 30:1017–1038, 1998.



## Danksagung

Herzlichen Dank . . .

. . . Priv.-Doz. Dr. Andreas Schadschneider für die Übernahme der Betreuung, die aufgeschlossene und unkomplizierte Unterstützung und für die Begutachtung,

. . . Prof. Dr. Rainer Schrader für entscheidende und motivierende Anregungen und für die Begutachtung,

. . . Dr. Peter Wagner für die engagierte fachliche Begleitung, Tips, Rat und Ermutigung und den langen Atem,

. . . Dr. Nils Eissfeldt für die großzügige und vielfältige Hilfe, nicht nur bei der Anwendung von FASTLANE, für seine Vorreiterrolle bei der Abwicklung der Formalia und seinen Ansporn,

. . . Elmar Brockfeld für die sehr gewissenhafte Prüfung des Textes auf vertretbare Rechtschreibung, Lesbarkeit und Konsistenz,

. . . den Kolleginnen und Kollegen am ZAIK und beim DLR für die Rücksichtnahme und Entlastung und wertvolle Diskussionen,

. . . dem SIMVV-Team, Heike Mühlhans, Ulrike Brüggemann, Guido Rindsfuser, Jens Ansoerge, Jürgen Gräfe und Philipp Melchior für die engagierten Diskussionen bei den Projekttreffen, von denen diese Arbeit profitiert hat, und für die Aufarbeitung von Daten, ohne die die Anwendung des Modells auf Köln kaum zu bewältigen gewesen wäre,

. . . den Entwicklern von freien und meist auch kostenlosen Programmen, wie emacs, mysql, python, swig, gnuplot, xfig,  $\text{\LaTeX}$ , linux, g++, . . . die sehr wertvolle und zuverlässige Werkzeuge sind,

. . . Markus Riedel, für die wohltuende Perspektive von außen auf die Forscherarbeit und den Hinweis auf die anderen essentiellen Dinge des Lebens,

. . . Petra Hertkorn-Betz, für die Begleitung durch Höhen und Tiefen im Entstehungsprozeß, für die vielfältige Unterstützung, das Vertrauen und das Einlassen auf für sie fachfremde Probleme,

. . . meiner Familie für Rückhalt, Ermutigung und Humor.



## Erklärung

Ich versichere, daß ich die von mir vorgelegte Dissertation selbständig angefertigt, die benutzten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben und die Stellen der Arbeit — einschließlich Tabellen, Karten und Abbildungen —, die anderen Werken im Wortlaut oder dem Sinne nach entnommen sind, in jedem Einzelfall als Entlehnung kenntlich gemacht habe; daß diese Dissertation noch keiner anderen Fakultät oder Universität zur Prüfung vorgelegen hat; daß sie — abgesehen von unten angegebenen Teilpublikationen — noch nicht veröffentlicht worden ist sowie, daß ich eine solche Veröffentlichung vor Abschluß des Promotionsverfahrens nicht vornehmen werde.

Die Bestimmungen der Promotionsordnung sind mir bekannt. Die von mir vorgelegte Dissertation ist von Priv.-Doz. Dr. Andreas Schadschneider und Prof. Dr. Rainer Schrader betreut worden.

## Teilpublikationen

Georg Hertkorn and Matthias Kracht: *Analysis of a large scale time use survey with respect to travel demand and regional aspects*. International Association for Time Use Research (IATUR) — Conference 2002, Lisbon

Georg Hertkorn and Peter Wagner: *Travel Demand modelling based on time use data*. 10<sup>th</sup> International conference on Travel Behaviour Research, 10. – 15. August 2004, Luzern.

